

PACC - Serie de investigación regional 2

Escenarios de cambio climático de las regiones Apurímac y Cusco: precipitación y temperatura 2030 y 2050



Programa de Adaptación al Cambio Climático PACC – Perú

Informe final de investigación del estudio bi-regional disciplinario realizado, en el marco del PACC, por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), titulado “Escenarios de cambio climático al 2030 y 2050 de las regiones Apurímac y Cusco”.

www.paccperu.org.pe

www.noticias.paccperu.org.pe

Mayo 2012

PACC Apurímac, Perú

Jirón Puno 107, Gobierno Regional de Apurímac

Teléfono: (51)(83) 322595

PACC Cusco, Perú

Jirón José Santos Chocano H-10, Urbanización Santa Mónica, Wanchaq.

Telefax: (51)(84)235229

PACC Lima, Perú

Avenida Ricardo Palma 857, Miraflores, Lima 18.

Teléfono: (51)(1)4440493

Elaborado por:

Dirección General de Meteorología del SENAMHI.

Corrección de estilos y diseño gráfico por:

Yadira Hermoza Ricalde

Primera Edición.

Reproducción autorizada si se cita la fuente. Este libro deberá ser citado de la siguiente manera: SENAMHI 2012. “Escenarios de cambio climático al 2030 y 2050 de las regiones Apurímac y Cusco”. Serie de investigación regional # 2. Programa de Adaptación al Cambio Climático PACC – Perú.



Escenarios de cambio climático en las regiones Cusco y Apurímac:

Precipitación y Temperatura 2030 y 2050

PACC - Serie de investigación regional 2

2012





PRESENTACIÓN

El Programa de Adaptación al Cambio Climático – PACC, con el objetivo de desarrollar conocimiento sobre las manifestaciones locales y regionales del cambio climático en Apurímac y Cusco, y sus impactos en los medios de vida de las poblaciones rurales de estos territorios, para dar soporte técnico-científico al establecimiento de políticas públicas, programas, proyectos y medidas específicas de adaptación, por parte de actores regionales y locales; impulsó un proceso de investigación a dos niveles: regional, con alcance en las dos regiones antes citadas, y local, circunscrito a dos microcuencas, Huacrahuacho en la provincia de Canas-Cusco y Mollebamba en la provincia de Antabamba-Apurímac.

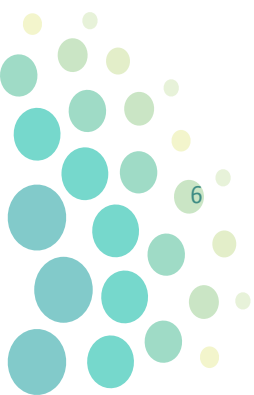
Este documento es el informe final de investigación del Estudio de Escenarios de cambio climático al 2030 y 2050 de las regiones Apurímac y Cusco, elaborado entre el 2010 y 2011 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología-SENAMHI, y forma parte de la serie de publicaciones digitales sobre las investigaciones realizadas en las regiones Apurímac y Cusco, ubicadas en los andes sur del Perú. Si bien, esta investigación fue llevada a cabo por la cooperación conjunta entre SENAMHI y PACC, los resultados, las conclusiones e interpretaciones presentes en este documento, son de estricta responsabilidad de SENAMHI.

Este estudio presenta los escenarios futuros de temperaturas y precipitaciones al 2030 y 2050 de las regiones Apurímac y Cusco, los que fueron generados a través del “downscaling” o regionalización de tipo estadístico y dinámico. La generación de escenarios a escala regional, permite determinar los posibles “cambios” del clima futuro, los posibles “efectos”, y además son una herramienta clave para la identificación e implementación de medidas de adaptación a nivel regional.

El Programa de Adaptación al Cambio Climático a través de esta publicación, pone a disposición de las autoridades, funcionarios y profesionales de las instituciones públicas y privadas, centros de investigación y universidades, los resultados de esta investigación, que pueden ser representativos respecto a los escenarios futuros de temperatura y precipitación a nivel regional en relación al cambio climático, en otras regiones del sur del país.

Esta publicación busca compartir el conocimiento desarrollado y coadyuvar a un proceso de adaptación basado en un entendimiento de esta realidad y de sus proyecciones.

Lenkiza Angulo Villarreal
Coordinadora Nacional
Programa de Adaptación al Cambio Climático-PACC



AGRADECIMIENTO

Este estudio es el resultado de la aplicación de metodologías que se han venido adoptando en los últimos diez años sobre variabilidad climática y cambio climático, en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), de los trabajos de campo en Cusco y Apurímac, y de las productivas discusiones científicas del equipo a cargo del estudio, con la Entidad Científica Suiza, en las personas de la Dra. Nadinne Salzmänn, Dr. Mario Rorher, Dra. Daniela Lorenzi, a quienes se expresa nuestro agradecimiento y reconocimiento.

Al equipo de PACC coordinado por la Arq. Lenkiza Angulo Villarreal, quienes brindaron todo el apoyo y logística necesaria para el desarrollo del estudio, nuestro agradecimiento y reconocimiento especial.

A los pobladores de las diversas comunidades de Cusco y Apurímac por su enriquecedora contribución sobre “percepción y saberes locales del clima”, quienes han permitido la investigación acción, nuestro agradecimiento y reconocimiento especial.

A todos nuestros colaboradores por su disposición y contribución para la culminación de este estudio, nuestro agradecimiento.

Asimismo, al gobierno suizo a través de la COSUDE por los fondos destinados al programa PACC que han permitido el desarrollo y culminación del estudio, nuestro agradecimiento y reconocimiento especial.





RESUMEN EJECUTIVO

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, en el marco del Programa de Adaptación al Cambio climático – PACC, financiado por la Agencia suiza para el desarrollo y la cooperación – COSUDE elaboró el estudio “Escenarios de Cambio climático en las regiones Cusco y Apurímac 2030”. Este documento pretende suministrar información a los sectores sensibles a cambios en las condiciones climáticas y a la comunidad de investigación. También, pretende ser un instrumento útil para la toma de decisiones, y ser fuente de conocimiento para la población en general; proporcionando la proyección del clima medio en el futuro (2030 y 2050) a resolución espacial de 20 km, información de las tendencias futuras de extremos climáticos, que ocasionan impacto directo en el bienestar y la población con daños en la economía, afectando la agricultura y los recursos hídricos, principalmente.

El estudio se acompaña de la cartografía de mapas estimados de escenarios, y cambios promedios de precipitación, temperatura máxima y mínima centrada en el año 2030 comprendido en el periodo 2016-2044 relativo, al periodo 1971-2000, que tiene como base el escenario moderado de gases de efecto invernadero A1B. Los escenarios climáticos presentados, son el resultados de la aplicación de técnicas de reducción de escala espacial denominadas “regionalización o downscaling” de tipo dinámica y estadística, y son explicadas en un contexto amplio, además de las incertidumbres asociadas en la generación de escenarios.

La cartografía de mapas se basa en la geoestadística, es decir, la combinación de técnicas estadísticas con la herramienta de información georeferenciada, la misma que ha facilitado la *interpolación* de la variable temperatura máxima y mínima a una resolución de 250 m, debido a la fuerte dependencia física y estadística de estas variables con la altitud, cuyo coeficiente de correlación múltiple que respalda esta relación, es del orden de 0.9. En el caso de la variable precipitación, se realiza un trazado manual de las isoyetas teniendo en cuenta la orografía y modelos conceptuales de la circulación atmosférica. El resultado es un documento que contiene 30 mapas, de escala temporal estacional y anual, así como también cuenta con cuadros de proyecciones locales en estaciones representativas de la región Cusco y Apurímac. Adicionalmente, el estudio cuenta con información de cambios proyectados del clima medio centrado en el año 2050 comprendido en el periodo 2035-2064, relativo al periodo 1971-2000.

Los resultados a escala regional para el periodo 2030, indican una variación *dentro del umbral de la variabilidad normal actual* ($\pm 15\%$) de la precipitación promedio anual y en el trimestre de inicio (SON) y periodo de mayores lluvias (DEF), en gran parte de las provincias de Cusco y Apurímac, excepto en la provincia de Abancay -Apurímac, y el extremo noroeste de la provincia de Quispicanchiss, en Cusco; alcanzarían aumentos entre 15 y 30% relativo al valor normal actual. En el trimestre de finalización de lluvias (MAM) se proyecta incrementos hasta de 30% en las provincias de Abancay, Andahuaylas y Chincheros en Apurímac; y la frontera de las provincias de Paucartambo, Calca, Cusco, Paruro, Quispicanchiss en Cusco, esta característica indicaría que el período de mayores lluvias DEF, en el futuro presentaría un desfase abarcando parte del trimestre MAM. La situación más relevante se presentaría en el periodo de estiaje (JJA); aunque en este trimestre las lluvias son escasas y las más bajas del año, se proyecta *deficiencias* muy importantes en Apurímac, en las provincias de Chincheros, Cotabambas, Grau y extremo sur de Abancay, las cuales alcanzarían hasta 30% y en

Antabamba y Andahuaylas, llegarían hasta 42%. En las provincias de Chumbivilcas, Espinar, Canas, Canchis el déficit alcanzaría entre 15 y 30% y llegarían hasta 42% en Anta y Calca, en Cusco. Este déficit pluviométrico indicaría situaciones asociadas a mayor estabilidad atmosférica, incremento de la temperatura durante el día, alta evaporación, sequedad del suelo con efectos relevantes en la hidrología local, principalmente, en el extremo sur de Apurímac y sur de Cusco.

En lo que respecta a la temperatura máxima del aire, se proyecta el incremento promedio anual entre 0.7 y 1.2°C en todo el ámbito geográfico de Cusco y Apurímac, principalmente en las provincias de Antabamba, Cotabambas, en Apurímac y las provincias de Chumbivilcas, Canas y Espinar, en Cusco. En el trimestre DEF, los incrementos de temperatura máxima se proyectan entre 0.5°C y 1.0°C en las provincias Chumbivilcas, Espinar, Canas, Paucartambo, Calca, zona oeste de la Convención en Cusco y en las provincias de Chincheros, Grau, Cotabambas, Antabamba y zona este de Abancay, en Apurímac. En el trimestre MAM, las temperaturas se proyectan entre 0.7 y 1.2°C en el ámbito geográfico de Cusco y Apurímac, principalmente al sur de las regiones. En el trimestre JJA, se proyectan los mayores incrementos en la temperatura máxima hasta 1.6°C en las provincias del este de Apurímac (Antabamba, Cotabambas, Grau) y sur de Cusco (Chumbivilcas y Espinar). El incremento de la temperatura del aire y por consiguiente de la superficie adyacente, en este trimestre, estaría asociado a la ocurrencia de escasa cobertura nubosa, formación de un fuerte gradiente de presión, aumentando la intensidad y frecuencia del viento local, y aunado la escasa cobertura vegetal, podrían dar lugar a efectos erosivos en los suelos de estas provincias. En el trimestre SON, los posibles incrementos de temperatura llegarían hasta 1.4°C, en la provincia La Convención, en Cusco.

Los cambios proyectados en la temperatura mínima del aire en el período anual y trimestre DEF, indican incrementos hasta en 1.3°C en el noroeste de la provincia La Convención, en Cusco y en la provincia Antabamba, en Apurímac. En el trimestre MAM, se proyectan los mayores incrementos de temperatura hasta 1.5°C; principalmente en las provincias de La Convención, Cusco, Anta, en la región Cusco, y en las de Chincheros, Andahuaylas y Antabamba en la región Apurímac. En el trimestre JJA, la característica termal de incremento de hasta 1.5°C indicaría heladas menos frecuentes y menos intensas; así como también, podrían ser relevantes para los nevados de la cordillera del Vilcabamba, en Cusco, principalmente. En el trimestre SON, los incrementos de la temperatura llegarían hasta 1.4°C en la zona oeste de la provincia La Convención, Cusco y la provincia de Chincheros en Apurímac.

La nueva característica termal en los trimestres SON, DEF y MAM, en Cusco y Apurímac, podrían tener efectos relevantes sobre el rendimiento, calidad, y migración de cultivos a otros pisos altitudinales de estas regiones, así como la aparición o acentuación de plagas y enfermedades.

De otro lado, las temperaturas mínimas en el trimestre MAM y las temperaturas máximas del aire en el trimestre JJA, son las que más incrementos muestran de 1.6 y 1.5°C, relativo al clima actual; y puede considerarse muy altos en relación a los cambios regionales o globales. Este comportamiento en las temperaturas, podría acentuar los deshielos de los glaciares, que en un primer momento ocasionarían el incremento de caudales y posterior disminución; lo que afectaría la agricultura bajo riego y la disponibilidad de agua para consumo humano, siendo los glaciares además de los ecosistemas de puna, la fuente principal de aseguramiento de la disponibilidad de agua para consumo en los meses de estiaje.

En lo que respecta a los extremos climáticos de precipitación 2030, tanto la intensidad diaria de la precipitación anual (SDII) y los días muy lluviosos (R95p), mantendrían en parte los patrones observados actualmente, con la generalización de la tendencia de aumento en Pisac, Granja Kcayra, Cay Cay, Ccatcca, en Cusco y en Curahuasi y Abancay, en Apurímac. Excepto la localidad de Acomayo donde se proyecta una consistente disminución de ambos índices, comportamiento que podría estar influenciado en mayor medida por los efectos locales como orografía, urbanismo, cambios en el uso del suelo, cambios en la circulación local, entre otros. En lo concerniente a la frecuencia de días consecutivos secos (CDD), existe alta incertidumbre en su proyección futura, siendo la tendencia en el clima actual de reducción. En tanto, los días consecutivos húmedos (CWD) de forma consistente se proyectan con un comportamiento regional de aumento en el 2030, pero sin significancia estadística.

En lo concerniente a los extremos climáticos de temperatura, en el 2030, se estima que las temperaturas de los días y las noches, tenderían a ser más cálidos, siendo significativo y de forma localizada en el período diurno; y regional en el período nocturno. La tendencia del número de días con noches frías (TN10p) en las localidades andinas de Curahuasi, Abancay y Chalhuanca, en Apurímac; y Urubamba, Pisac, Granja Kcayra, Cay Cay, Ccatcca, Acomayo y Sicuani, en Cusco; indican una disminución significativa, y mayor frecuencia de días con noches cálidas (TN90p).

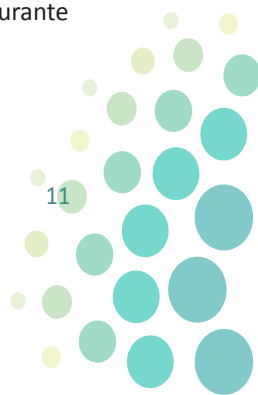
El escenario de cambio en el régimen de heladas meteorológicas, indica una tendencia consistente de disminución significativa del número de heladas meteorológicas¹ (FDO), comportamiento que se mantendría similar a lo observado actualmente; principalmente en las localidades andinas de Cusco (Granja Kcayra, Ccatcca, Acomayo y Sicuani). En tanto, en la localidad de Chalhuanca, en Apurímac; no hay señal de tendencia, es decir, el número de heladas meteorológicas en el futuro no mostraría cambios o posiblemente desaparecerían en el futuro; que es coherente con la tendencia de aumento de los valores mínimos de la temperatura mínima del aire y la disminución significativa de los días fríos en el 2030.

Respecto a la magnitud y sentido de la tendencia del rango diurno de temperatura (DTR)² en el 2030, existe alta incertidumbre, podría darse dos situaciones importantes: el aumento en la temperatura máxima sea mayor al incremento de la temperatura mínima o el aumento en la temperatura mínima sea mayor al de la máxima. La tendencia de cambios en los extremos de temperaturas máxima y mínima del aire en el futuro podría ser relevante en el rendimiento de los cultivos de seguridad alimentaria (papa, trigo, cebada, habas y maíz), y de comercialización, así como también, con efectos negativos en los pastizales andinos y en el sector pecuario.

En el futuro 2050 se ha identificado la acentuación del déficit de precipitación, en relación al 2030, en la zona sur de las regiones. Déficits que se generalizarían en todos los trimestres del año, con reducciones importantes en los meses de época seca (JJA) hasta en 75% relativo al clima actual. Las temperaturas máximas y mínimas del aire mostrarían posibles aumentos promedio hasta en 2°C. Estos cambios en los patrones de precipitación y temperaturas, podrían tener efectos negativos en los ecosistemas de punas húmedas que se extiende entre los 3000 y 6000 msnm –vitales para sostenibilidad de las poblaciones altoandinas- donde los pastizales nativos tienen la capacidad de retener y regular el agua para asegurar su disponibilidad durante

1 Helada meteorológica: temperatura mínima menor a 0°C

2 Variación de la temperatura máxima del aire respecto a la mínima



JJA; además de la contribución de los glaciares. Estas condiciones posibles de fuerte deficiencia de lluvias y calentamiento, ocasionarían el aumento de la intensidad y frecuencia de vientos, alta evapotranspiración, y sumado a ello las actividades de sobrepastoreo, ascenso de la frontera agrícola, tala, entre otros; tendría efectos en la reducción de la capacidad de regulación y retención del agua por el sistema pastizal-suelo, poniendo en riesgo la disponibilidad de agua de la población asentada en éstas regiones.

Finalmente, los resultados presentados pertenecen a la segunda fase que complementa al estudio de Caracterización Climática actual en las regiones Cusco y Apurímac; y podrá ser actualizado en una tercera fase con los nuevos escenarios de emisiones del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (siglas en inglés, CMIP5) del Panel Intergubernamental de Cambio climático (siglas en inglés, IPCC).

CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....I

AGRADECIMIENTO.....II

RESUMEN EJECUTIVO.....III

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN.....1

CAPÍTULO 2.

ESCENARIOS 3

2.1 LOS ESCENARIOS DE EMISIONES..... 3

2.2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....5

2.3 INCERTIDUMBRES EN LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS.....7

2.4 MODELOS DE ÚLTIMA GENERACIÓN PARA ESCENARIOS.....9

CAPÍTULO 3.

SÍNTESIS METODOLÓGICA.....15

3.1 DATOS.....18

3.2 METODOLOGÍA.....48

3.2.1 Explorando las incertidumbres del clima futuro en Cusco y Apurímac.....49

3.2.2 Intercomparación de modelos globales.....50

3.2.3 Estimación de escenarios regionales del clima futuro en Cusco y Apurímac.....51

3.3.3 Índices de extremos climáticos de temperatura y precipitación.....52

CAPÍTULO 4.

ESCENARIOS PROYECTADOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN CUSCO Y APURÍMAC.....53

4.1 EXPLORANDO LAS INCERTIDUMBRES DEL CLIMA FUTURO EN CUSCO Y APURÍMAC, MODELOS GLOBALES.....53

4.2 INTERCOMPARACIÓN DE MODELOS53

4.3 PROYECCIONES REGIONALIZADAS DEL CLIMA MEDIO EN CUSCO Y APURÍMAC 2030.....53

4.4 ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PROYECTADA 2030.....53

4.5 PROYECCIONES REGIONALIZADAS PARA CUSCO Y APURÍMAC 2050

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

5.1 CLIMA MEDIO A ESCALA LOCAL 2030.....58

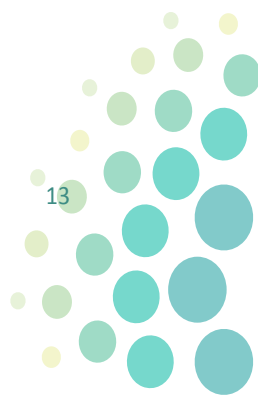
5.2 CLIMA MEDIO A ESCALA REGIONAL 2030.....59

ANEXOS.....59

ANEXO 01. ESCENARIOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PROYECTADA PARA EL PERÍODO 2030.....60

ANEXO 02. CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA PROYECTADA PARA EL PERÍODO 2050.....60

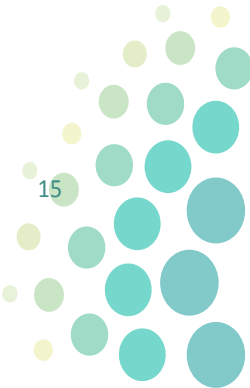
ANEXO 03. BASE MATEMÁTICA DE LAS TÉCNICAS APLICADAS.....60



ACRÓNIMOS

Anticiclón del Atlántico Sur	AAS
Alta de Bolivia	AB
Air Force Weather Agency	AFWA
Modelo de Circulación Global Océano Atmosférico	AOGCM
Anticiclón del Pacífico Sur	APS
Fourth Assessment Report: Climate Change 2007	AR4
Bjerknes Centre for Climate Research Norway	<u>BCCR</u>
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis Canada	<u>CCCma</u>
Días secos consecutivos	CDD
CPC Merged Analysis of Precipitation	CMAP
Coupled Model Intercomparison Project 3	CMIP3
Coupled Model Intercomparison Project 5	CMIP5
Análisis de Componentes Principales	CPA, CP
Australia’s Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Australia	<u>CSIRO</u>
Días húmedos consecutivos	CWD
Trimestre Diciembre-Enero-Febrero	DEF
Rango diurno de temperatura	DTR
Ensamble de Multi-Modelos Acoplados de Circulación General	EMM-MACG
El Niño Oscilación Sur	ENOS
Empirical Ortogonal Functions	EOF
ECMWF 40 Year Re-analysis	ERA-40
Naval Research Laboratory, University of Oklahoma y la Federal Aviation Administration	FAA
Días de Heladas	FDO
Forecast System Laboratory	FSL
Unidades Hectopascales	hPa
Panel Intergubernamental de Cambio climático	IPCC
Trimestre Junio-Julio-Agosto	JJA
Japan Meteorological Agency	JMA
Unidades Kilometro	Km
Modelo Atmosférico de Circulación General	MACG
Trimestre Marzo-Abril-Mayo	MAM
Ministerio del Ambiente del Perú	MINAM
Max-Planck-Institut for Meteorology Germany	<u>MPI-M</u>
Meteorological Research Institute Japan	<u>MRI</u>
National Centre for Atmospheric Research USA	<u>NCAR</u>
National Center for Atmospheric Research	NCAR
National Centers for Environmental Prediction	NCEP
National Institute for Environmental Studies Japan	<u>NIES</u>
National Oceanic and Atmospheric Administration	NOAA
Precipitación PP	

Proyecto Regional Andino de Adaptación	PRAA
Precipitación en días húmedos	PRCPTOT
Programa Nacional de Fortalecimiento de Capacidades para Manejar el Impacto del Cambio climático y la Contaminación del Aire – PROCLIM	PROCLIM
Presión a nivel del Mar	PSL
Días muy húmedos	R95p
Días extremadamente húmedos	R99p
Regional Climate Model	RCM
Root Mean Square Error	RMSE
Segunda Comunicación Nacional de Cambio climático	SCNCC
Índice de intensidad diaria de precipitación	SDII
Trimestre Setiembre-Octubre-Noviembre	SON
Temperatura del aire	Ta
Noches frías	Tn10p
Noches calientes	Tn90p
Temperatura Mínima Mínima	Tnn
Temperatura Superficial del Mar	TSM
Días fríos	Tx10p
Días calientes	Tx90p
Temperatura Máxima Máxima	Txx
Viento Zonal y meridional	U y V
UK Met. Office UK	<u>UKMO</u>
Weather Research and Forecast	WRF
Altura Geopotencial	Z
Zona de Convergencia del Atlántico Sur	ZCAS
Zona de Convergencia Intertropical	ZCIT
Experiments run with greenhouse gasses increasing as observed through the 20th century.	20C3M





I. INTRODUCCIÓN

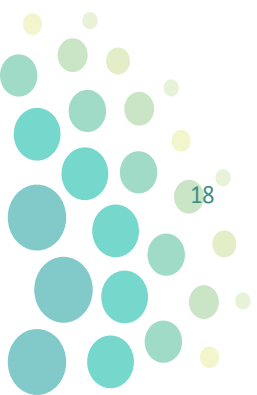
La generación de escenarios climáticos a escala regional y local es de gran relevancia, ya que permite proyectar los posibles “cambios” del clima en el futuro; además es clave para implementar estrategias de adaptación y enfrentar los posibles impactos del cambio climático global.

La herramienta básica para estimar las proyecciones climáticas son los Modelos de Circulación General Acoplados Océano Atmósfera (AOGCMs, siglas en inglés). Los AOGCMs permiten simular el clima pasado, actual y futuro, a pesar de su limitada resolución espacial (110-280 km) y la representación suavizada de la cordillera de los Andes, presentan mejoras con el paso de los años en la representación de los procesos físicos a través de sus esquemas de parametrización de radiación y convección principalmente. Así como las interrelaciones entre las componentes del sistema climático atmósfera-océano-superficie terrestre-biosfera-criósfera.

En la actualidad, los AOGCMs, sus procesos físicos, sus condiciones de entrada -que tienen implícito las asunciones del curso que tomarán las concentraciones de los gases de efecto invernadero- están asociados a niveles de incertidumbres, por lo tanto es importante intercomparar las diferentes variables provenientes de los diferentes modelos en su estado climático de referencia (simulación de control), para determinar qué modelos representan de manera más realista el clima en la región sudamericana y cuán confiables podrían ser sus proyecciones. Esta información posteriormente, es utilizada para obtener proyecciones del clima en el futuro en alta resolución espacial (20 km), y a escala local en Cusco y Apurímac, mediante las técnicas de reducción de escala denominadas “downscaling” o “regionalización” dinámica y estadística.

La intercomparación comprendió ocho modelos globales del IPCC (BCCR-BCM2.0, CCCma-CGCM3, CSIRO-Mk3.0, GFDL-CM2.1, MPI-M-ECHAM5-OM, NCAR-CCSM3, NIES-MIROC3.2m, UKMO HadCM3) y el modelo de reanálisis como patrón del clima presente, en las variables: viento, altura geopotencial, temperatura del aire, presión a nivel del mar y temperatura superficial del mar.

Los escenarios proyectados de temperatura y precipitación en las regiones Cusco y Apurímac, son generados mediante “downscaling” de tipo estadístico y dinámico con la incorporación del factor de la variabilidad interanual, técnicas adoptadas en proyectos anteriores por el Centro de Predicción Numérica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), como en el marco del Programa Nacional de Fortalecimiento de Capacidades para Manejar el Impacto del Cambio climático y la Contaminación del Aire



(PROCLIM, 2004), Proyecto Regional Andino de Adaptación (PRAA, 2007) y Segunda Comunicación Nacional de Cambio climático (SCNCC, 2008).

La técnica de incorporación del factor de la variabilidad interanual, se aplicó a las salidas del modelo regional WRF, simulado en SENAMHI para la proyección del clima futuro en Cusco y Apurímac, y también a las salidas del Modelo Atmosférico de Circulación General (MACG) TL959L60 de alta resolución espacial (Instituto de Investigación y Agencia Meteorológica del Japón MRI/JMA, siglas en inglés). La alta resolución de este modelo global (20 km), hizo innecesaria la reducción de escala. El modelo TL959L60 MRI/JMA de última generación presenta una buena distribución espacial y estacional de los principales sistemas de mesoescala como la Zona de Convergencia Intertropical, Zona de Convergencia del Atlántico Sur, los Sistemas de Presión de Pacífico y Atlántico Sur y los vientos hasta 11 km de altura (SENAMHI, 2007), que modulan el clima regional de Sudamérica.

La técnica de regionalización dinámica se basa en el uso de Modelos Climáticos Regionales o de área limitada (RCMs, siglas en inglés), los cuales permiten adaptar las salidas de los Modelos de Circulación General Océano-Atmósfera (AOGCMs) a las características orográficas de una determinada región con una resolución espacial apta para ser utilizada en distintas aplicaciones; que tienen como datos de entrada las proyecciones climáticas, entre ellas los modelos de impactos de rendimientos de cultivos, hidrológicos, hidráulicos, entre otros.

Los RCMs, resuelven las ecuaciones dinámicas de la atmósfera y el océano, que relacionadas con los AOGCMs, sobre una grilla más fina, se obtienen proyecciones climáticas en alta resolución. Estos modelos se utilizan a menudo para la desagregación espacial de las salidas de los modelos de circulación global; aunque se requiere mucho tiempo y demanda computacional para obtener los resultados. Por lo general, sólo un número pequeño de modelos están disponibles para una determinada región de interés (Buytaert W., 2010).

Los resultados obtenidos, de todas las técnicas señaladas, están orientados a presentar los cambios promedios en la precipitación y temperatura centrado en el año 2030, comprendido en el período 2016-2044, y centrado en el año 2050 comprendido en el periodo 2035-2064, ambos relativos al clima base 1971-2000, debido a que los cambios en el clima se detectan en periodos largos de tiempo ~30 años. Estas proyecciones del clima futuro constituyen una aproximación para los periodos mencionados y se han desarrollado en el marco del Programa de Adaptación al Cambio climático (PACC) con soporte científico de la Entidad Científica Suiza (ECS). Finalmente, los cambios en las variables mencionadas son expresados en mapas en escala temporal: promedio anual y estacional: verano (período de máximas lluvias diciembre-enero-febrero, (DEF), otoño (finalización de lluvias marzo-abril-mayo, (MAM), invierno (período de estiaje junio-julio-agosto, (JJA) y primavera (período de inicialización de lluvias setiembre-octubre-noviembre, (SON). Estos escenarios climáticos tienen como base el uso de un solo escenario de emisiones el A1B, que incorpora las emisiones moderadas de los gases de efecto invernadero y aerosoles (Panel Intergubernamental de Cambio climático IPCC, 2001 a, b).



II. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO

2.1 Los escenarios de emisiones

Los escenarios de emisiones representan una visión posible del desarrollo futuro de las emisiones de sustancias que tienen un efecto radiativo potencial (gases de efecto invernadero y aerosoles), basados en una combinación coherente e internamente consistente de asunciones sobre forzamientos controladores de demografía, desarrollo socioeconómico, cambios en la tecnología y de sus interacciones (Marengo, J., 2006). En el 2000, el IPCC finalizó su Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (sigla en inglés, SRES) ideado por Nakicenovic y otros. Estos escenarios examinan el período de 1990 al 2100 e incluyen diversos supuestos socioeconómicos como la población mundial y el producto bruto interno. Los escenarios SRES fueron utilizados como base de las proyecciones climáticas para el 2100 en Modelos de Circulación General Acoplados Océano Atmósfera (AOGCM, siglas en inglés) en el Tercer Reporte de Evaluación (sigla en inglés, TAR). Los SRES están constituidos por cuatro familias de escenarios: A1, A2, B1 y B2 (IPCC 2001 a, b) presentando las siguientes características:

A1: La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciendo una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Las cuestiones más importantes son la interacción cultural y social entre las regiones y la capacitación, con una importante reducción de las diferencias regionales en los ingresos per cápita. La familia de los escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil (A1F1), de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes denominado también escenario de estabilización (A1B) donde el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final.

A2: La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad humana en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional, el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

B1: La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.

B2: La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y a la equidad social, se centra en las escalas: local y regional.

Por otro lado, en el 2007 el IPCC señala que hay un mayor acuerdo y evidencia de que con las políticas actuales de mitigación del cambio climático y las prácticas relacionadas con el desarrollo sostenible, continuarán aumentando las emisiones globales de gases de efecto invernadero durante las próximas décadas. De otro lado indican que los escenarios de emisiones de referencia publicados en SRES 2000, están dentro del rango presentado en el escenario post-SRES, ver figura 1a.

2.2 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son definidos como descripciones plausibles, coherentes y consistentes de cómo el estado medio del clima y/o la variabilidad de sus propiedades en el largo plazo pueden cambiar, estos pueden deberse a procesos internos naturales, forzamientos externos y a las actividades humanas que tienen como efecto el aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero que se reflejan de forma persistente en la composición química de la atmósfera, principalmente.

Entre los Gases de Efecto Invernadero (GEI) antropógenos, es considerado como el más importante el dióxido de carbono (CO_2). Sus emisiones anuales según IPCC, 2007 aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. Las concentraciones atmosféricas de CO_2 (379 ppm) y CH_4 (1774 ppmm) en el 2005 exceden el umbral natural de los últimos 650.000 años. El aumento de la concentración mundial de CO_2 se debe principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una menor parte, a los cambios de uso de la tierra. Asimismo, el aumento observado de la concentración de metano (CH_4), según IPCC 2007, se debe al quemado de combustibles fósiles y biomasa, al incremento de ganado vacuno. El aumento de óxido nitroso (N_2O) principalmente debido a la agricultura, también está contribuyendo al calentamiento.

De otro lado, el IPCC señala con un alto grado de confianza, que las actividades humanas desde 1750 han contribuido al aumento de la temperatura del aire, y en los últimos doce años (1995-2006), once figuran entre los años más cálidos desde 1850. La tendencia lineal de la temperatura desde 1906-2005, es de 0.74°C superior a la tendencia observada de 1901-2000 de 0.6°C , lo cual ha sido indicado en el Tercer Informe de Evaluación (sigla en inglés, TAR). Este calentamiento observado y su variación han sido simulados mediante *modelos globales acoplados* de última generación que contemplan forzamientos antropógenos (figura 1b).

Aunque los modelos climáticos presentan mejoras en el tiempo aún existen procesos complejos para *simular de forma realista los cambios en las temperaturas a escalas regionales*.

El IPCC, 2007 señala las influencias humanas que han contribuido en los procesos siguientes:

- En el aumento del nivel del mar durante la segunda mitad del siglo XX con la escala de muy probablemente.
- El incremento de la temperatura de las noches extremadamente cálidas, de las noches frías y de los días fríos; en la escala de probablemente.
- La intensificación del riesgo de olas de calor e incremento de la superficie afectada por la sequía desde los años 70 y la frecuencia de las precipitaciones intensas en términos de más probable que improbable.
- La concordancia espacial entre las regiones del mundo que han experimentado un calentamiento apreciable y los lugares en que se han observado cambios apreciables en numerosos sistemas, atribuyendo la escala de muy improbable que se deba únicamente a la variabilidad natural.

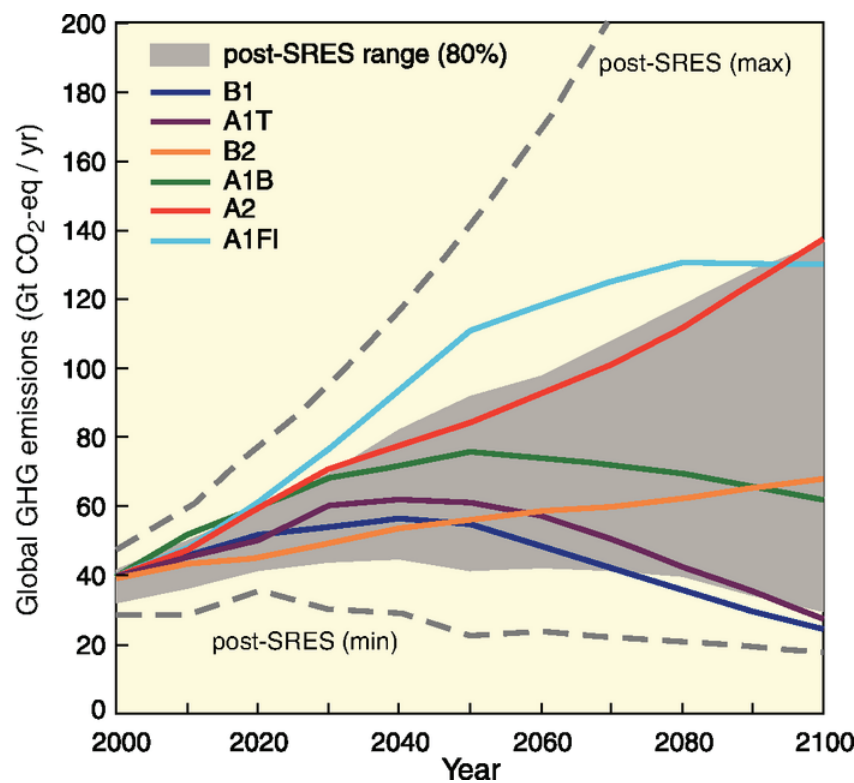


Figura 1a: Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (en Gt de CO₂-eq por año) en ausencia de políticas climáticas adicionales: seis escenarios ilustrativos de SRES (líneas de color) y el rango del percentil 80 de los escenarios recientes publicados en post-SRES (área sombreada en gris). Las líneas discontinuas muestran la gama completa de post-SRES. Las emisiones incluyen CO₂, CH₄, N₂O y gases fluorados. 1 Gt es igual a 109 toneladas. Fuente: IPCC AR4, Climate Change 2007. Synthesis Report.

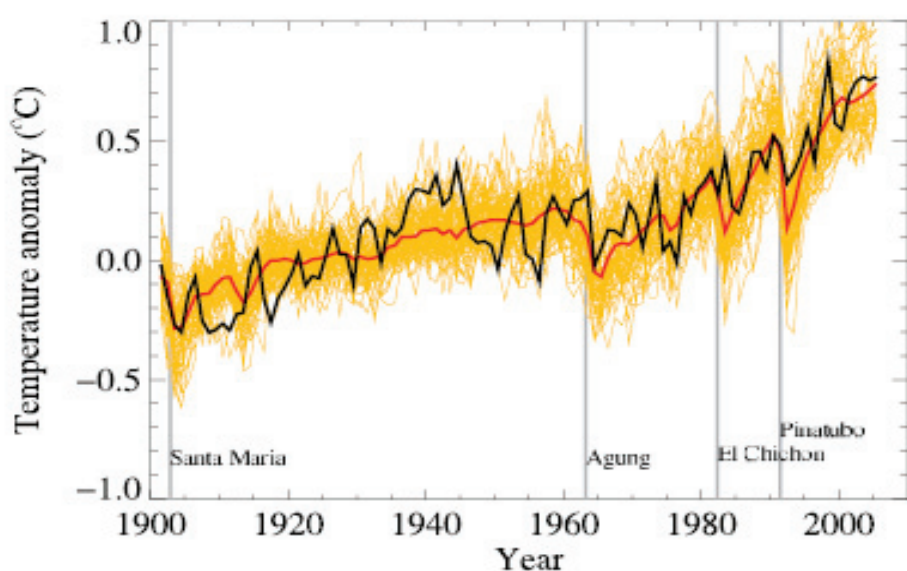


Figura 1b: Anomalía de la temperatura media cerca de la superficie en el siglo XX en relación a la media desde 1901 hasta 1950, las observaciones están en color negro, las 58 simulaciones producidas a partir de 14 modelos climáticos diferentes forzados con factores naturales y humanos están en color amarillo. La media de todas simulaciones se muestra en línea roja. Las líneas verticales grises indican el tiempo de las grandes erupciones volcánicas. (Fuente: IPCC AR4).

2.3 Incertidumbres en los escenarios

La incertidumbre está implícita en el desarrollo del escenario, por tanto la obtención de proyecciones o “escenarios regionales de cambio climático” está sujeta a una variedad de fuentes de incertidumbre que afectan a todos los pasos del proceso para su generación, comenzando desde asunciones del curso que tomarán en el futuro las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles que afectan al forzamiento radiativo de los modelos globales, hasta los modelos de simulación del clima futuro a escala regional. Cada paso conducente a la generación de proyecciones regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores (Brunet, M. et al. 2009).

Las fuentes de incertidumbre de los escenarios están asociados a:

La evolución futura de las emisiones que dependerá de la marcha de la economía, del desarrollo tecnológico, de las fuentes energéticas disponibles, del patrón de consumo energético, de la demografía, de las decisiones políticas y de las asociadas a los modelos globales de circulación general. Los modelos se basan en distintas formulaciones de las ecuaciones termodinámicas y dinámicas que describen los distintos componentes del sistema climático, considerando distintas grillas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, y otros.

2.4 Modelos y técnicas de última generación para escenarios

Los Modelos de Circulación General Acoplados Océano Atmósfera, son un conjunto de ecuaciones dinámicas y termodinámicas que “representan” los principales procesos físicos, dinámicos, químicos y las interacciones de las componentes del sistema climático (superficie terrestre-atmósfera-oceano-hielo-biósfera), basado en las leyes y principios de conservación de masa, energía y momento que gobiernan dichos procesos. Estas leyes físicas son usadas para simular el clima pasado, actual y su evolución futura a largo plazo, por lo que demandan mayor capacidad de procesamiento y tiempo computacional. Los AOGCMs para simular escenarios de cambio climático a diferencia de los modelos de predicción climática y del tiempo consideran además de la forzante natural, la forzante antropogénica en sus simulaciones. En los AOGCMs, las componentes océano-atmósfera son divididas en grillas de dimensiones regulares o irregulares (ver tabla 1a) y cuanto mayor tamaño tenga la grilla menor será la resolución espacial y viceversa. Muchos de los AOGCMs globales presentan baja resolución (110 - 280 km), proporcionando información climática a escala gruesa sobre una región determinada, en ese sentido el uso de Modelos Climáticos Regionales (RCM, siglas en inglés) pueden tomar mayores resoluciones y mostrar mayor habilidad en la proyección del clima en una región específica.

A pesar de la limitación de los AOGCMs en cuanto a resolución espacial, Brunet, et al 2009 señala que “la comparación de simulaciones globales con observaciones sugieren que los modelos son bastante fiables en la reproducción de las características del clima a gran escala” (continental).

De otro lado, para que las proyecciones de los AOGCM de baja resolución sean más realistas y puedan ser utilizadas para inicializar modelos de impactos: hidrológicos, hidráulicos, de rendimiento de cultivos, entre otros; se mejora la resolución con la aplicación de técnicas de reducción de escala (downscaling o regionalización). Estas técnicas adaptan las salidas de los modelos globales a las características fisiográficas de una determinada región con una resolución apropiada para ser directamente utilizadas en modelos de impactos.

Las técnicas de downscaling o regionalización se pueden agrupar en estadísticas o dinámicas:

- Las técnicas estadísticas, se basan en hipótesis establecidas donde las *relaciones lineales o no lineales cuantitativas* entre predictores (de gran escala) y predictandos (de escala local) son invariables frente al cambio climático. De otro lado estas técnicas por lo general demandan menor tiempo computacional; aunque los métodos no lineales desarrollados recientemente se basan en complejos algoritmos de optimización no lineal y requieren un mayor tiempo de procesamiento.
- Las técnicas dinámicas de reducción de escala, se basan en el uso de modelos regionales de área limitada y tienen la característica de ser *físicamente* consistentes y demandan mayor capacidad y tiempo de procesamiento.

En consecuencia, los AOGCMs constituyen herramientas potenciales para la proyección del clima en alta resolución espacial, ya sea como forzantes de un RCM o como predictores de gran escala de las técnicas estadísticas.

El avance de los AOGCMs desde TAR hasta los utilizados en el Cuarto Reporte de Evaluación (AR4) del IPCC, se resumen en 4 categorías:

1. Mejoras en los esquemas de resolución de ecuaciones como la advección, que consiste en el transporte de masa o energía. En el AR4 muchos modelos empezaron a utilizar el esquema semi-lagrangiano, junto con los ya utilizados espectrales y diferencias y volúmenes finitos. Además de mejoras en la resolución horizontal y vertical de los modelos conlleva a representar mejor las características climáticas a escala global y regional.
2. Inclusión de nuevos procesos como el de aerosoles, y la inclusión de modificaciones en las concentraciones de gases invernaderos por procesos químicos. Se dio un gran avance en la manera de incluir *la dinámica del ciclo de carbono* en los modelos, pero no se llegó a utilizar en las proyecciones dadas en el AR4 (ver figura 1c). Por otro lado, se dieron mejoras en los procesos que relacionan la superficie-tierra, hielo y océano con la atmósfera, como los procesos de humedad de suelo y presencia de vegetación.
3. Mejora en las parametrizaciones de los procesos radiativos, de nubes y de capa límite; relacionados al flujo de radiación en el tope de la atmósfera y la producción de precipitación.
4. Mejoras en el proceso de acoplamiento para interpolación entre las grillas del océano y la atmósfera, y nuevos esquemas que garantizan la conservación de flujos a nivel global o local en la interface aire-mar, en la parte terrestre y flujos de hielo del mar.

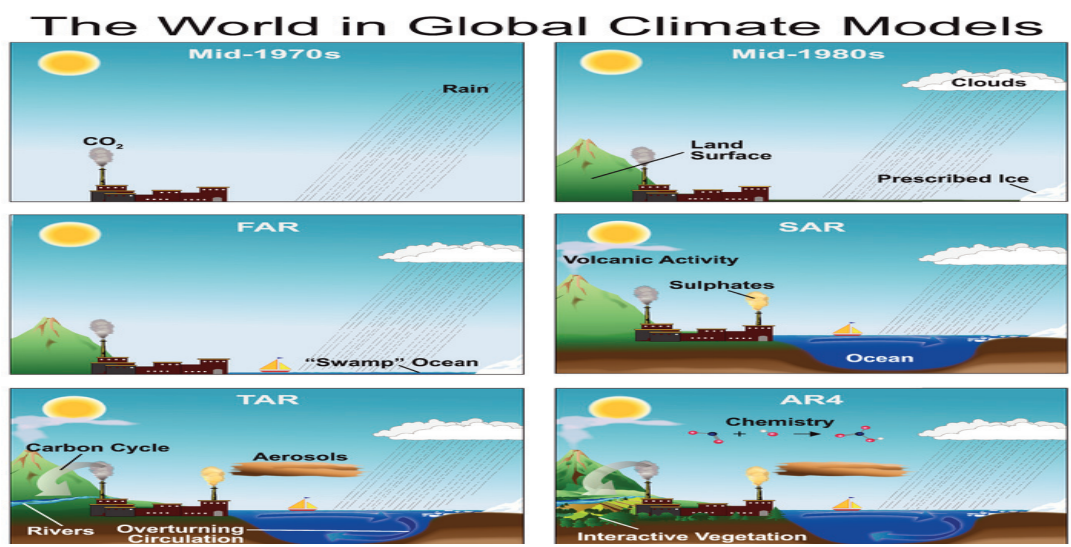
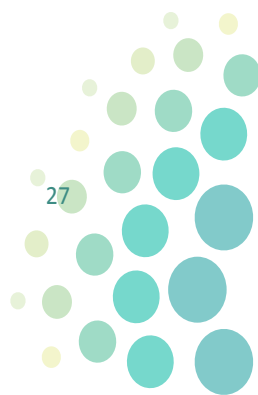


Figura 1c: Complejidad de los modelos climáticos en la última década y sus interacciones con las diferentes componentes del sistema climático y la incorporación de procesos químicos atmosféricos. Fuente: IPCC, 2007-AR4.





III. SINTESIS METODOLOGICA

3.1 Datos

Para generar escenarios futuros del clima regionalizados en Cusco y Apurímac se han utilizado las simulaciones de ocho modelos globales (AOGCMs) del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4), de un total de 24 disponibles. Estas salidas provienen de ocho Centros Internacionales de Predicción Climática y un resumen de las características principales de los AOGCMs se indica en la tabla 1a y en línea en: http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html.

AOGCMs	ATMOSFERA	OCÉANO	HIELO MARINO	SUPERFICIE TERRESTRE	ACOPLAMIENTO
	Resolución horizontal y vertical	Resolución horizontal y vertical	Dinámica, conducción de hielo	Suelo, Vegetación	Calor, Agua dulce
	Tope de atmosfera	Contorno, Coordenada		Ríos	Momento de superficie
BCCR-BCM2.0,2005	T63 (~1.9º x 1.9º) L31	0.5º - 1.5º x 1.5º L35	Reología, conducción	Multicapas, Canopea	Sin ajustes
	Top = 10 hPa	Libre, Densidad	Hibler, 1979	Ríos	Furevik et al., 2003
	Deque et al., 1994	Bleck et al., 1992	Harder, 1996	Mahfout et al., 1995	
				Douville et al., 1995	
CCSM3,2005	T85 (~1.4º x 1.4º) L26	0.3º - 1º x 1º L40	Reología, conducción	Multicapas, Canopea	Sin ajustes
	Top = 2.2 hPa	Libre, Profundidad	Briegleb et al.2004	Rios	Collins et al., 2006
	Collins et al., 2004	Smith y Gent, 2002		Oleson et al., 2004	
				Branstetter, 2001	

CGCM3.1(T47),2005	T47 (~2.8º x 2.8º) L31	1.9º x 1.9º L29	Reología, conducción	Multicapas, Canopea	Calor, Agua dulce
	Top = 1 hPa	Rígida, Profundidad	Hibler, 1979	Ríos	Flato, 2005
	McFarlane et al., 1992	Pacanowski et al., 1993	Flato y Hibler, 1992	Verseghy et al., 1993	
	Flato, 2005				
CSIRO-Mk3.0,2001	T63 (~1.9º x 1.9º) L18	0.8º x 1.9º L31	Reología, conducción	Multicapas, Canopea	Sin ajustes
	Top = 4.5 hPa	Rígida, Profundidad	O'Farrell, 1998	Gordon et al. 2002	Gordon et al. 2002
ECHAM5-OM,2005	Gordon et al. 2002 T63 (~1.9º x 1.9º) L31	Gordon et al., 2002 1.5º x 1.5º L40	Reología, conducción	Cubo, Canopea	Sin ajustes
	Top = 10 hPa	Libre, Profundidad	Hibler, 1979	Ríos	Jungclaus et al., 2005
	Roeckner et al., 2003	Marsland et al. 2003	Semtner , 1976	Hagemann, 2002	
				Hagemann y Dümenil-Gates, 2001	
GFDL-CM2.1,2005	2.0º x 2.5º L24	0.3º – 1º x 1º	Reología, conducción	Cubo, Canopea	Sin ajustes
	Top = 3 hPa	Libre, Profundidad	Winton, 2000	Ríos	Delworth et al. 2006
	GFDL GAMDT, 2004 con transporte semi-lagrangino	Gnanadesikan et al, 2004	Delworth et al., 2006	Milly y Shmakin, 2002	
				GFDL GAMDT, 2004	
MIROC3.2(medres), 2004	T42 (~2.8º x 2.8º) L20	0.5º – 1.4º x 1.4º L43	Reología, conduccion	Multicapas, Canopea	Sin ajustes
	Top = 30 km				
	K – 1 Developers, 2004	Libre, Sigma/ profundidad	K – 1 Developers, 2004	Ríos	K – 1 Developers, 2004
		K – 1 Developers, 2004		K – 1 Developers, 2004	
HadCM3 -UKMO,2000	2.5º x 3.75º L19	1.25º x 1.25º L20	Fluido libre, conducción	Multicapas, Canopea	Sin ajustes
	Top = 5 hPa	Rígido, Profundidad			Gordon et al., 2000
	Pope et al., 2000	Gordon et al., 2000	Cattle y Crossley, 1995	Ríos	
				Cox et al., 1999	

Tabla 1a: Características principales de los Modelos Globales del Cuarto Informe del IPCC.

Las variables y datos utilizados se indican a continuación:

- Datos mensuales de los Modelos Globales del Cuarto Informe del IPCC. Simulación de Control 20C3M período: 1971-2000 y período futuro: 2001-2064 en los niveles mandatorios de presión 850hPa, 500hPa, 200hPa. En la tabla 1b se observa los modelos y variables seleccionados, siendo el escenario común los modelos el escenario moderado de emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles A1B (IPCC 2001 a, b).

VARIABLES	INSTITUCION - MODELO										
	BCCR -BCM2.0	CCCma -CGCM3	CSIRO -Mk3.0	GFDL- CM2.1	MPI- M -ECHAM5- OM	NCAR- CCSM3	NIES -MIROC 3.2m	TL959L60 MRI/ JMA	UKMO HadCM3	Reanálisis	
										NCAR	ERA40
Temperatura del aire ta [k]	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Altura geopotencial zg [m]	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Componente de viento zonal ua [m/s]	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Componente del viento meridional [m/s]	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Humedad relativa hur [%]	X		X	X	X	X	X		X	X	
Precipitación acumulada total pr [kg m-2 s-1]	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Presión a nivel del mar psl [Pa]	X	X	X	X	X	X	X		X		
Temperatura cerca de la superficie tas [k]	X	X	X	X	X	X	X		X		
Temperatura máxima (superficie) tasmax [k]	X		X				X	X			
Temperatura mínima (superficie) tasmin [k]	X		X				X	X			
Temperatura (Skin) ts [k]	X	X	X	X	X	X	X		X		
PAIS	Noruega	Canada	Australia	USA	Alemania	USA	Japón		Reino Unido	USA	Fra.
RESOLUCION	1.9x1.9, L31	1.9x1.9, L31	1.9x1.9, L18	2.0x2.5, L24	1.9x1.9, L31	1.4x1.4, L26	2.8x2.8, L20 20 Km/L60		2.5x3.75, L19	2.5x2.5	

Tabla 1b: Variables utilizadas provenientes de Modelos Globales del Cuarto Informe del IPCC escenario A1B y reanálisis, en niveles verticales de la estructura de la atmósfera 1500 m (850hPa), 5000 m (500hPa) y 11000 m (200hPa).

- Datos mensuales de presión a nivel del mar, precipitación, temperatura máxima y mínima del aire del modelo TL959L60 MRI/JMA de 20 km de resolución espacial. Período climático de referencia (simulación de control): 1979-2003 y período futuro: 2016-2039.
- Datos mensuales de viento a 11 Km (u y v) del modelo TL959L60 MRI/JMA de 60 km de resolución espacial. Período climatológico 1979-2003.
- Datos mensuales de temperatura del aire, altura geopotencial, componente del viento (u, v) y humedad relativa de los modelos de reanálisis NCAR y ERA40 del período climático 1971-2000.

Cabe señalar que la información de reanálisis del NCEP fue utilizada para realizar las simulaciones con el modelo WRF en la zona de estudio para determinar la parametrización más adecuada para la precipitación, así como para la intercomparación con ocho modelos globales del AR4 IPCC. El reanálisis ERA 40 fue utilizado a partir de los resultados de la intercomparación de modelos, para la validación de tres modelos que representan mejor la circulación sudamericana en año niño, por ser la información del ERA40 aparentemente mejor respecto al reanálisis de NCEP.

- Datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar de Reynolds para el período 1982-2000. Fuente: NOAA NCEP EMC CMB Global Rey Smith. En línea: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/docfind/databrief/cat-airsea.html>

- Datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) de diferentes modelos climáticos globales (HadCM3, ECHAM5-OM, CCSM3) para el período 1960-2000 correspondiente a la simulación de control 20C3M y datos para el período del 2001-2059 escenario moderado A1B de emisiones de la base de datos del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones del Cuarto Informe de Evaluación (SRES AR4, sigla en inglés), ver tabla 2.

Centro	Acrónimo del Centro	Modelo	20C3M	ESCENARIO A1B
Instituto Meteorológico de Alemania Max-Planck Centro Nacional de Investigación Atmosférica (Estados Unidos) Oficina Meteorológica del Reino Unido	MPI-M	ECHAM5-OM	run_1	run_1
	NCAR	CCSM3	run_1	run_1
	UKMO	HadCM3	run_1	run_1

Fuente: http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html

Tabla 2: Modelos utilizados del IPCC SRES AR4 con datos de TSM

También se han utilizado datos medidos en estaciones meteorológicas ubicadas en Cusco y Apurímac y estaciones de apoyo o vecinas a estas regiones citadas, correspondientes a la red observacional que administra el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). A continuación se detalla los datos utilizados:

- Datos mensuales y diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire de estaciones meteorológicas representativas ubicadas en Cusco y Apurímac. El período de los datos es 1965-2008. Sus coordenadas geográficas son descritas en la tabla 3a.

REGIONES	ESTACION METEOROLOGICA	UBICACIÓN		
		LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m)
CUSCO	Granja Kcayra	-13°33'24"	-71°52'14"	3219
	Ccatcca	-13°36'36"	-71°33'37"	3729
	Sicuani*	-14°15'13"	-71°14'14"	3574
	Urubamba	-13°18'38"	-72°07'26"	2863
	Pisac	-13°24'58"	-71°50'59"	2950
	Cay Cay	-13°36'1"	-71°42'1"	3150
	Acomayo	-13°55'1"	-71°41'1"	3160
APURIMAC	Abancay*	-13°36'30"	-72°52'14"	2750
	Curahuasi*	-13°33'9"	-72°44'6"	2763
	Chalhuanca*	-14°20'0"	-73°10'0"	2850

Tabla 3a: Coordenadas de las estaciones meteorológicas ubicadas en Cusco y Apurímac

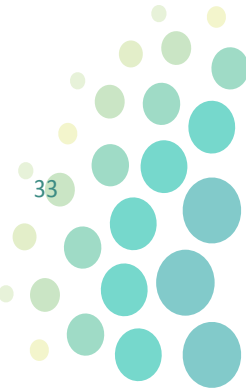
(*) Información tratada (completada), ver estudio de Caracterización Climática para las regiones Cusco y Apurímac, SENAMHI 2010.

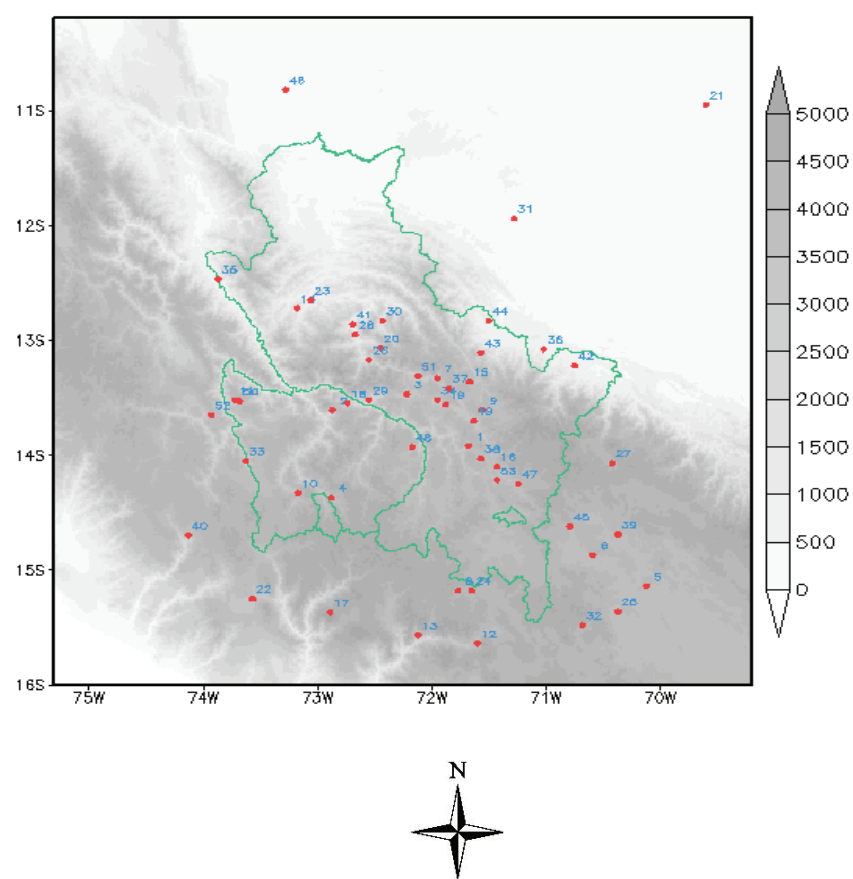
- Información de precipitación y temperatura del aire promedio multianual 1971-2000 de estaciones meteorológicas ubicadas en Cusco y Apurímac y estaciones vecinas, sus características de ubicación geográfica son descritas en la tabla 3b y su distribución espacial se muestran en las figuras 2 (a y b).

Es importante señalar que las estaciones meteorológicas seleccionadas están ubicadas en distintos pisos altitudinales de la vertiente occidental y oriental de los andes, además de las estaciones ubicadas en selva; estas últimas presentan una serie corta de información y son utilizadas como referencia.

TEMPERATURA MAXIMA				TEMPERATURA MINIMA			
ESTACIÓN	LAT	LON	ALT	ESTACIÓN	LAT	LON	ALT
ABANCAY 1	-72.87	-13.61	2750	ABANCAY 1	-72.87	-13.61	2750
ACOMAYO 2	-71.68	-13.92	3160	ACOMAYO 2	-71.68	-13.92	3160
ANTA ANCACHURO 3	-72.22	-13.47	3340	ANDAHUAYLAS 3	-72.35	-15.5	3587
ANTABAMBA 4	-72.88	-14.37	3639	ANTA ANCACHURO 4	-72.22	-13.47	3340
ARAPA 5	-70.12	-15.14	3920	ANTABAMBA 5	-72.88	-14.37	3639
AYAVIRI 6	-70.59	-14.87	3920	ARAPA 6	-70.12	-15.14	3920
CALCA 7	-71.95	-13.33	2926	AYAVIRI 7	-70.59	-14.87	3920
CAYLLOMA 8	-71.77	-15.18	4420	CAYLLOMA 8	-71.77	-15.18	4420
CCATCCA 9	-71.56	-13.61	3729	CCATCCA 9	-71.56	-13.61	3729
CHALHUANCA 10	-73.17	-14.33	2850	CHALHUANCA 10	-73.17	-14.33	2850
CHINCHEROS 11	-73.72	-13.52	2772	CHINCHEROS 11	-73.72	-13.52	2772
CHIVAY 12	-71.6	-15.64	3633	CHIVAY 12	-71.6	-15.64	3633
CHOCO 13	-72.12	-15.57	2473	CHOCO 13	-72.12	-15.57	2473
CIRIALO 14	-73.18	-12.72	900	COMBAPATA 14	-71.43	-14.1	3464
COLQUEPATA 15	-71.67	-13.36	3729	COTAHUASI 15	-72.89	-15.37	2683
COMBAPATA 16	-71.43	-14.1	3464	CURAHUASI 16	-72.74	-13.55	2763
COTAHUASI 17	-72.89	-15.37	2683	GRANJA KCAYRA 17	-71.88	-13.56	3219
CURAHUASI 18	-72.74	-13.55	2763	INCUYO 18	-73.57	-15.25	3296
GRANJA KCAYRA 19	-71.88	-13.56	3219	IÑAPARI 19	-69.6	-10.95	273
HUYRO 20	-72.45	-13.07	1700	KITENI 20	-73.06	-12.65	760
INCUYO 21	-73.57	-15.25	3296	LA ANGOSTURA 21	-71.65	-15.18	4150
IÑAPARI 22	-69.6	-10.95	273	LAMPA-PUNO22	-70.37	-15.36	3900
KITENI 23	-73.06	-12.65	760	MACUSANI 23	-70.42	-14.07	4331
LA ANGOSTURA 24	-71.65	-15.18	4150	MARANURA 24	-72.67	-12.95	1500
LAMPA-PUNO25	-70.37	-15.36	3900	MOLLEPATA 25	-72.55	-13.52	2803
MACHU PIC.26	-72.55	-13.17	2563	OCOBAMBA 26	-72.43	-12.83	1900
MACUSANI 27	-70.42	-14.07	4331	OLLACHEA 27	-70.5	-13.8	3420
MARANURA 28	-72.67	-12.95	1500	ORCOPAMPA 28	-72.34	-15.26	3779
MOLLEPATA 29	-72.55	-13.52	2803	PAKITZA 29	-71.28	-11.94	319
OCOBAMBA 30	-72.43	-12.83	1900	PAMPAHUTA 30	-70.68	-15.48	4320
PAKITZA 31	-71.28	-11.94	319	PAUCARAY 31	-73.63	-14.05	3280
PAMPAHUTA 32	-70.68	-15.48	4320	PERAYOC 32	-71.95	-13.52	3365
PAUCARAY 33	-73.63	-14.05	3280	PICHARI 33	-73.87	-12.47	540
PERAYOC 34	-71.95	-13.52	3365	PILCOPATA 34	-71.02	-13.08	900
PICHARI 35	-73.87	-12.47	540	PISAC 35	-71.85	-13.42	2950
PILCOPATA 36	-71.02	-13.08	900	PROGRESO 36	-70.37	-14.69	3965
PISAC 37	-71.85	-13.42	2950	PULLHUAY 37	-72.77	-15.15	3455
POMACANCHI 38	-71.57	-14.03	3200	PUQUIO 38	-74.13	-14.7	3219
PROGRESO 39	-70.37	-14.69	3965	QUILLABAMBA 39	-72.69	-12.86	990
PUQUIO 40	-74.13	-14.7	3219	ROCOTAL 40	-71.57	-13.11	2010
QUILLABAMBA 41	-72.69	-12.86	990	SALVACIÓN 41	-71.5	-12.83	520
QUINCÉMIL 42	-70.75	-13.22	651	SEPA 42	-73.28	-10.82	307
ROCOTAL 43	-71.57	-13.11	2010	SICUANI 43	-71.24	-14.25	3574
SALVACIÓN 44	-71.5	-12.83	520	TAMBOBAMBA 44	-72.17	-13.93	3275
STA ROSA 45	-70.79	-14.62	3940	URIPA 45	-73.68	-13.53	3280
SEPA 46	-73.28	-10.82	307	URUBAMBA 46	-72.12	-13.31	2863
SICUANI 47	-71.24	-14.25	3574	VILCASHUAMAN 47	-73.93	-13.65	3650
TAMBOBAMBA 48	-72.17	-13.93	3275	YANAoca 48	-71.43	-14.22	3913
URCOS 49	-71.63	-13.7	3149				
URIPA 50	-73.68	-13.53	3280				
URUBAMBA 51	-72.12	-13.31	2863				
VILCASHUAMAN 52	-73.93	-13.65	3650				
YANAoca 53	-71.43	-14.22	3913				

Tabla 3b: Coordenadas de las estaciones meteorológicas ubicadas en Cusco y Apurímac y estaciones de apoyo.





b a

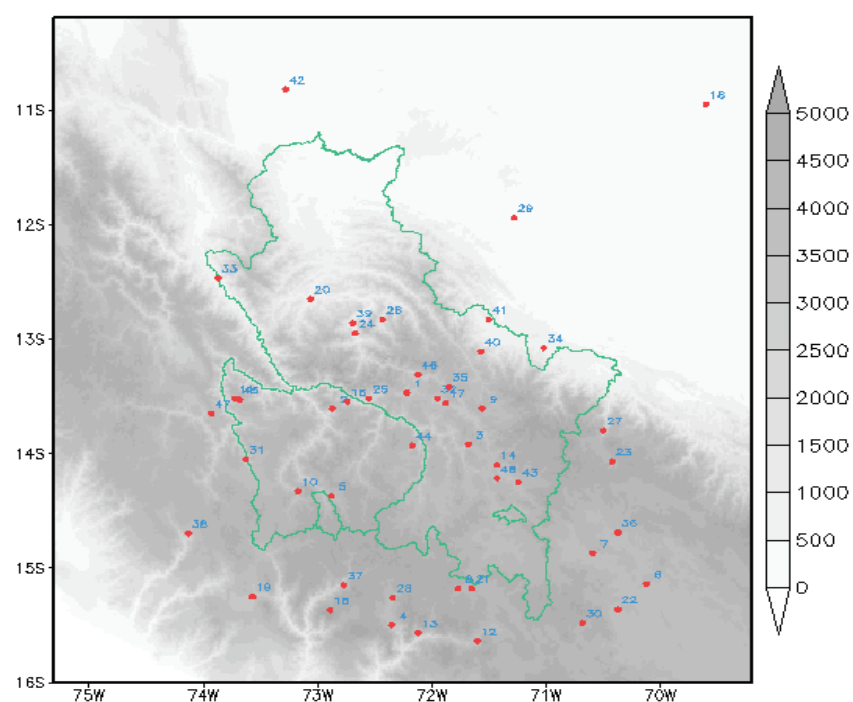
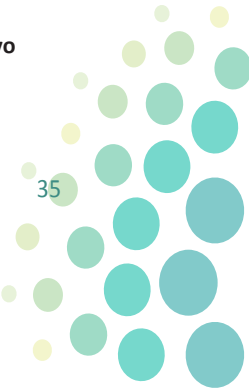
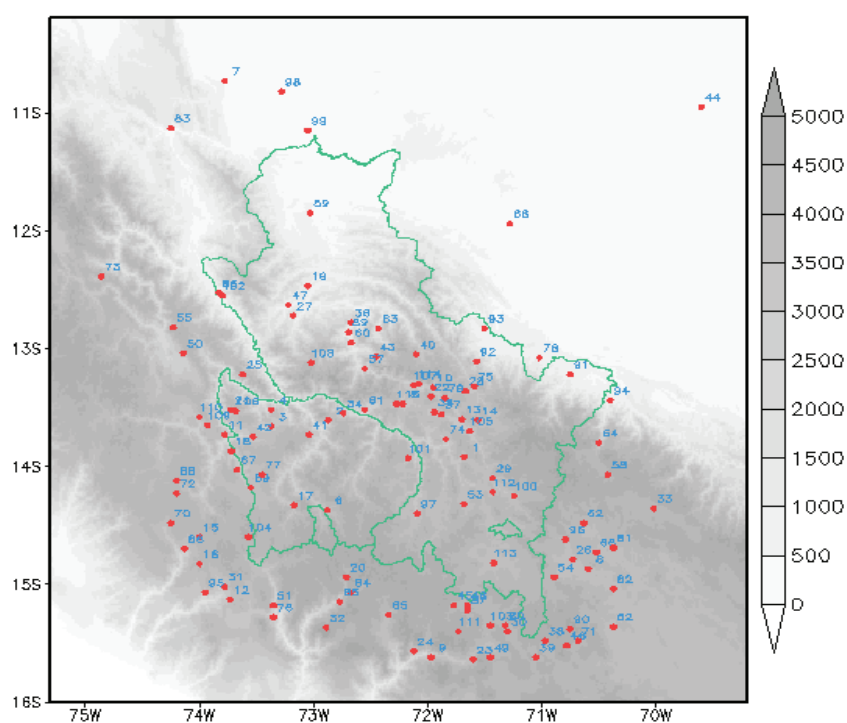


Figura 2 a y b: Ubicación de estaciones meteorológicas en Cusco y Apurímac y estaciones vecinas, variable temperatura máxima 53 estaciones, y variable temperatura mínima del aire, 48 estaciones.

PRECIPITACION							
ESTACIÓN	LAT	LON	ALT	ESTACIÓN	LAT	LON	ALT
ABANCAY 1	-72.87	-13.61	2750	MACUSANI 58	-70.42	-14.07	4331
ACOMAYO 2	-71.68	-13.92	3160	MALVINAS 59	-73.03	-11.85	431
ANDAHUAYLAS 3	-73.37	-13.66	2866	MARANURA 60	-72.67	-12.95	1500
ANDARAPA 4	-73.37	-13.52	3215	MOLLEPATA 61	-72.55	-13.52	2803
ANTA ANCACHURO 5	-72.22	-13.47	3340	NUÑO A 62	-70.63	-14.48	4135
ANTABAMBA 6	-72.88	-14.37	3639	OCOBAMBA 63	-72.43	-12.83	1900
ATALAYA 7	-73.78	-10.73	450	OLLACHEA 64	-70.5	-13.8	3420
AYAVIRI 8	-70.59	-14.87	3920	ORCOPAMPA 65	-72.34	-15.26	3779
CABANACONDE 9	-71.97	-15.62	3379	ORURILLO 66	-70.52	-14.73	3920
CALCA 10	-71.95	-13.33	2926	PAICO 67	-73.67	-14.03	3450
CARHUANCA 11	-73.78	-13.73	3100	PAKITZA 68	-71.28	-11.94	319
CARHUANILLA12	-73.73	-15.13	3000	PAMPACHIRI 69	-73.55	-14.18	3364
CAY CAY 13	-71.7	-13.6	3150	PAMPAHUASI 70	-74.25	-14.48	3650
CCATCCA 14	-71.56	-13.61	3729	PAMPAHUTA 71	-70.68	-15.48	4320
CCECCAÑA 15	-74	-14.6	4100	PAMPAMARCA 72	-74.2	-14.23	3400
CECCHAPAMPA 16	-74	-14.83	3900	PAMPAS 73	-74.86	-12.39	3240
CHALHUANCA 17	-73.17	-14.33	2850	PARURO 74	-71.84	-13.77	3084
CHILCAYOC 18	-73.72	-13.87	3410	PAUCARTAMBO 75	-71.59	-13.32	3042
CHIMPARINA 19	-73.05	-12.47	960	PAUZA 76	-73.35	-15.28	2560
CHINCHAYLLAPA 20	-72.71	-14.94	4100	PECOPE 77	-73.45	-14.07	4050
CHINCHEROS 21	-73.72	-13.52	2772	PILCOPATA 78	-71.02	-13.08	900
CHITAPAMPA 22	-71.97	-13.41	3600	PISAC 79	-71.85	-13.42	2950
CHIVAY 23	-71.6	-15.64	3633	PORPERA 80	-71.32	-15.35	4195
CHOCO 24	-72.12	-15.57	2473	PROGRESO 81	-70.37	-14.69	3965
CHUNGUI 25	-73.62	-13.22	3468	PUCARÁ 82	-70.37	-15.04	3910
CHUQUIBAMBILLA PUNO 26	-70.73	-14.79	3950	PTO OCOPA 83	-74.25	-11.13	690
CIRIALO 27	-73.18	-12.72	900	PUICA 84	-72.67	-15.07	3362
COLQUEPATA 28	-71.67	-13.36	3729	PULLHUAY 85	-72.77	-15.15	3455
COMBAPATA 29	-71.43	-14.1	3464	PQUIO 86	-74.13	-14.7	3219
CONDOROMA 30	-71.3	-15.4	4160	PUSA PUSA 87	-71.65	-15.22	4190
CORA CORA 31	-73.78	-15.02	3172	PUTACCASA 88	-74.2	-14.12	4100
COTAHUASI 32	-72.89	-15.37	2683	QUILLABAMBA 89	-72.69	-12.86	990
CRUCERO 33	-70.02	-14.36	4130	QUILLISANI 90	-70.75	-15.38	4600
CURAHUASI 34	-72.74	-13.55	2763	QUINCEMIL 91	-70.75	-13.22	651
CUSCO 35	-71.94	-13.54	3399	ROCOTAL 92	-71.57	-13.11	2010
ECHARATE 36	-72.67	-12.78	667	SALVACIÓN 93	-71.5	-12.83	520
GRANJA KCAYRA 37	-71.88	-13.56	3219	SAN GABÁN 94	-70.4	-13.44	640
HCDA. ATECATE 38	-70.97	-15.48	4350	SANCOS 95	-73.95	-15.07	2800
HCDA. MOROTE 39	-71.05	-15.62	4438	STA ROSA 96	-70.79	-14.62	3940
HUACHIBAMBA 40	-72.1	-13.05	2900	STO TOMÁS 97	-72.09	-14.4	3253
HUANCABAMBA 41	-73.04	-13.73	1666	SEPA 98	-73.28	-10.82	307
HUANCARAY 42	-73.53	-13.75	2902	SEPAHUA 99	-73.05	-11.15	500
HUYRO 43	-72.45	-13.07	1700	SICUANI 100	-71.24	-14.25	3574
IÑAPARI 44	-69.6	-10.95	273	TAMBOBAMBA 101	-72.17	-13.93	3275
JANACANCHA 45	-71.77	-15.18	4320	TERESITA 102	-73.8	-12.55	650
JARPANA 46	-70.78	-15.52	4300	TISCO 103	-71.45	-15.35	4175
KEPASHIATO 47	-73.22	-12.63	865	URAYHUMA 104	-73.57	-14.6	4170
LA ANGOSTURA 48	-71.65	-15.18	4150	URCOS 105	-71.63	-13.7	3149
LA PULPERA 49	-71.45	-15.62	4021	URIPA 106	-73.68	-13.53	3280
LA QUINUA 50	-74.14	-13.04	3240	URUBAMBABA 107	-72.12	-13.31	2863
LAMPA (AYACUCHO) 51	-73.35	-15.18	2880	VILCABAMBAMBA108	-73.02	-13.12	4000
LAMPA-PUNO 52	-70.37	-15.36	3900	VILCASHUAMAN 109	-73.93	-13.65	3650
LIVITACA 53	-71.68	-14.32	3741	VISCHONGO 110	-74	-13.58	3141
LLALLY 54	-70.89	-14.94	4190	VISUYO 111	-71.73	-15.4	4620
LURICOCHA 55	-74.23	-12.82	2625	YAN AOCA 112	-71.43	-14.22	3913
MACHENTE 56	-73.83	-12.53	1250	YAURI 113	-71.42	-14.82	3927

Tabla 3c: Coordenadas de las estaciones meteorológicas ubicadas en Cusco y Apurímac y estaciones de apoyo





c

Figura 2c: Ubicación de estaciones meteorológicas en Cusco y Apurímac y estaciones vecinas, variable precipitación (115 estaciones).

Además de la información observada en estación meteorológica, se complementa con la información procesada en SENAMHI resultado de la regionalización dinámica con el modelo WRF siendo esta:

- Información de precipitación y temperatura del aire en los time slice o períodos:
 - a) 1971-2000 (simulación de control)
 - b) 2016-2044 (escenarios)
 - c) 2045-2064 (escenarios)

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Explorando las incertidumbres del clima futuro en Cusco y Apurímac

Se realiza la exploración de la incertidumbre de los cambios futuros en la temperatura media y precipitación para el 2030 en las regiones Cusco y Apurímac; proyectado por ocho diferentes modelos globales (AOGCMs) disponibles del IPCC SRES AR4 correspondiente al escenario de emisión A1B, información que fue regrillada a ~250 km de resolución horizontal (2.5°x2.5°) la base matemática de la interpolación se detalla en anexo 8.3.3.

3.2.2 Intercomparación de modelos Globales

Esta etapa comprende la evaluación e intercomparación de las variables atmosféricas regrilladas a una resolución espacial de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (vientos a 850 hPa, altura geopotencial a 200 hPa, espesores 850-200 hPa, Temperatura Superficial del Mar) provenientes de las simulaciones de control de ocho modelos globales del IPCC (ver tabla 1 (a y b) versus las variables similares de reanálisis, en el período promedio anual y estacional 1971-2000, julio 1997 y febrero 1998; siendo el área de análisis Sudamérica.

Para la evaluación de los modelos se ha utilizado los estadísticos: bias, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y la correlación de anomalías asociado a un nivel de significancia de 0.05.

3.2.3 Estimación de escenarios regionales del clima futuro en Cusco y Apurímac

La estimación de escenarios de precipitación y temperatura 2030 en las regiones de estudio se basa en la evaluación de tres técnicas:

3.2.3.1 Construcción de escenarios de precipitación y temperatura del modelo TL959L60 MRI/JMA

La construcción de escenarios a escala regional consistió en el uso de las salidas del Modelo Atmosférico de Circulación General (MACG) TL959L60.

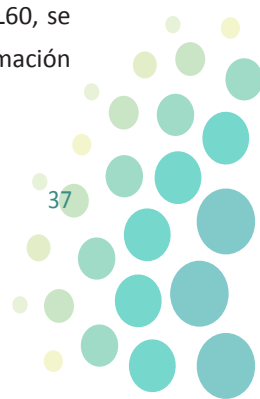
El MACG TL959L60 presenta truncamiento de 959 con una grilla gaussiana lineal TL959 que corresponde a una resolución horizontal de 20 Km, siendo actualmente este modelo global que presenta la resolución más alta de los MACG utilizados en los experimentos de calentamiento global. El número de niveles verticales es de 60, con un tope en 0,1 hPa.

El uso de este modelo global de alta resolución, hace innecesaria la reducción de escala o downscaling. Sin embargo, no todos los centros del clima en el mundo tienen la capacidad del súper computador “Earth Simulator” (Habata et al, 2004) para simular el clima actual y futuro a alta resolución.

La simulación del modelo MACG TL959L60, fue realizada con el experimento de time-slice (Bengtsson et al., 1996; IPCC, 2001), este experimento consiste en lo siguiente: El modelo es integrado por 25 años como un primer time-slice correspondiente a la simulación del clima actual, para lo cual el modelo atmosférico fue forzado con datos climáticos observados de TSM y concentración de hielo oceánico del HadISST (Rayner et al., 2003). Para la nueva simulación del clima futuro finalizada en el 2009 a diferencia de los datos disponibilizados por MRI/JMA en el 2007; el modelo fue forzado en el segundo time slice, con una superposición de:

- a) Cambios de la TSM proyectada por el Ensemble de Multi-Modelos Acoplados de Circulación General (EMM-MACG) del Coupled Model Intercomparison Project 3 (CMIP3) con referencia a los períodos (2015~2039) – (1979~2003),
- b) Tendencia lineal del EMM-MACG del CMIP3 para el período 2015-2039, y
- c) La anomalía de TSM histórica observada sin tendencia (HadISST, 1979-2003).

A las salidas de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire proveniente del MACG TL959L60, se incorpora en sus dos time-slice la variabilidad climática interanual observada 1971-2000 según la aproximación (Hulme y Lu, 2000).



3.2.3.2 Regionalización o Downscaling dinámico

La regionalización dinámica, para el presente estudio, se llevó a cabo con el modelo Advanced Research WRF (Weather Research and Forecast) versión 3.2, el cual fue forzado por el modelo global ECHAM5-OM de quinta generación desarrollado por el Instituto de Meteorología Max Planck de Alemania, el cual representa coherentemente las variables atmosféricas en distintos niveles de presión (ver 3.1 y 4.1). El Modelo Regional WRF, es un modelo de mesoescala no hidrostático, aplicado tanto en pronóstico operativo como en investigación, fue construido por esfuerzo conjunto de la National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast System Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, University of Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA). El Advanced Research WRF versión 3.01 ha sido implementado en SENAMHI desde el 2008 para pronóstico del tiempo (corto plazo) obteniéndose una buena performance en la predicción de precipitaciones para el país mostrando resultados satisfactorios en el análisis sinóptico de escala diaria. En el 2010 se implementó la versión 3.2 para la proyección del clima de largo plazo, después de realizar corridas de prueba se adaptó para simular el clima en las regiones de estudio, configurándose 18 niveles en la estructura vertical de la atmósfera. El WRF para proyección de largo plazo fue ejecutado para simular el clima actual y su evolución futura en las regiones Cusco y Apurímac con la configuración que se detalla en la tabla 4:

Parametrización	Cúmulos	Microfísica	Superficie del suelo	Capa límite planetaria	Capa de superficie	Radiación atmosférica	
						Onda larga	Onda corta
Configuración	Grell-Devenyi	WSM 3-class scheme	Pleim-Xiu Land Surface Model (EPA)	Asymmetrical Convective Model, Version 2 (ACM2) PBL (Pleim and Chang)	Pleim-Xiu surface layer	RRTM	MM5 (Dudhia)

Tabla 4: Configuración del modelo WRF

Se establecen dos dominios de simulación:

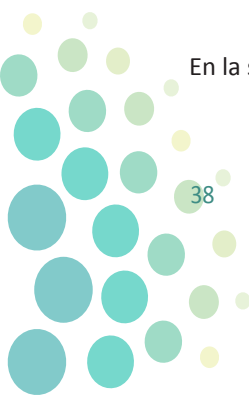
- Dominio 1 (Sudamérica a resolución de 60 km)
- Dominio 2 (Perú a resolución de 20 km).

Las simulaciones realizadas fueron en tres períodos (o time slice):

- El primer período de simulación comprendió desde 1971-2000 (período de control o de clima actual).
- El segundo 2016-2044 y
- Tercer período de 2045-2064 (períodos del clima futuro).

El primer periodo de simulación considera inherente la evolución observada del contenido global de CO₂ y de aerosoles sulfato (SUL), y el segundo y tercer período de simulación, la evolución correspondiente a los escenarios de emisiones antropogénicas SRES-A1B del IPCC, 2001 (Nakicenovic y Swart, 2000).

En la simulación se consideró tres fases:



- Fase de preprocesamiento, se prepara las condiciones de entrada al modelo WRF, siendo las variables atmosféricas (humedad relativa, vientos, altura geopotencial, presión, temperatura del aire, Temperatura Superficial del Mar y la temperatura de suelo) provenientes del modelo global ECHAM5-OM las que están en formato netCDF convertidas a formato grib. El modelo ECHAM5-OM presenta una resolución espacial de 1.9°x1.9° con 31 niveles verticales, incluye un esquema radiativo, interacción con la superficie, procesos de convección, nubes y de forma implícita el efecto de gases de efecto invernadero y aerosoles (escenario moderado A1B).
- En la fase de procesamiento, la TSM y temperatura de suelo fueron actualizadas cada 6 horas, para inicializar los perfiles de humedad del suelo. Este proceso de reinicialización se realizó cada dos años; y se consideró el período de un mes, para que el modelo llegue a la estabilización.

En la figura 3 se esquematiza los procesos de downscaling dinámico aplicada en la generación de escenarios de temperatura y precipitación 2030 en las regiones Cusco y Apurímac.

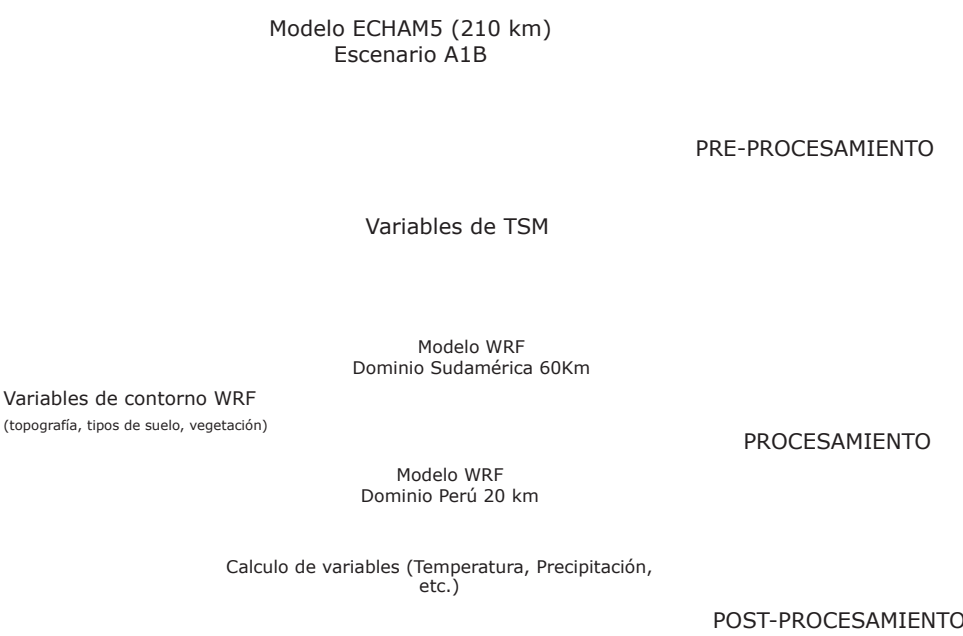


Figura 3: Esquema de la metodología de downscaling dinámico para la generación de escenarios del clima futuro en las regiones Cusco y Apurímac.

- En la fase de postprocesamiento, se calcula la precipitación acumulada, temperatura máxima y mínima promedio del aire para el dominio de Cusco y Apurímac. Estas variables luego de ser promediadas a nivel diario y posteriormente a nivel mensual, fueron extraídas en coordenadas de ubicación de estación meteorológica mediante la interpolación bilinear. Se elimina el error sistemático del modelo y se incorpora la variabilidad climática, mediante la corrección de tipo directo (Lenderink et al. 2006) con las siguientes relaciones:

Temperatura

$$T_{fut,direct}(t) = T_{fut}(t) + (\bar{T}_{obs} - \bar{T}_{cont}), t = 1, \dots, 12J$$

$$T_{fut,direct}(t) = T_{fut}(t) + (\bar{T}_{obs} - \bar{T}_{cont}), t = 1, \dots, 12J \dots\dots\dots 1$$

Precipitación

$$P_{fut,direct}(t) = P_{fut}(t) \times (\bar{P}_{obs}/\bar{P}_{cont}), t = 1, \dots, 12J$$

$$P_{fut,direct}(t) = P_{fut}(t) \times (\bar{P}_{obs}/\bar{P}_{cont}), t = 1, \dots, 12J \dots\dots\dots 2$$

Dónde:

$[T_{fut,direct}, P_{fut,direct}, T_{fut,direct}, P_{fut,direct}]$: Valor del modelo con inclusión de la variabilidad climática.

$[T_{fut}, P_{fut}, T_{fut}, P_{fut}]$: Valor mensual del escenario proveniente del modelo.

$[\bar{T}_{obs}, \bar{P}_{obs}, \bar{T}_{obs}, \bar{P}_{obs}]$: Climatología mensual proveniente de datos instrumentales durante el período 1971 - 2000

$[\bar{T}_{cont}, \bar{P}_{cont}, \bar{T}_{cont}, \bar{P}_{cont}]$: Climatología mensual del modelo durante el período 1971 - 2000

Los escenarios climáticos de precipitación son promediados, centradas en el 2030 y 2050 que considera períodos desde el 2016- 2044 y 2036-2064, respectivamente. Están basados en la metodología de Hulme y Lu, 2000, similar procedimiento se llevó a cabo para la temperatura.

3.2.3.3 Downscaling estadístico

Se establece relaciones empíricas espaciales entre el predictando de escala local (precipitación/temperatura) y el predictor de gran escala Temperatura Superficial del Mar a través de la función de transferencia Análisis de Componentes Principales (CPA, siglas en inglés).

La información de TSM es proveniente de tres modelos acoplados HadCM3 (Reino Unido), ECHAM5-OM (Alemania) y el CCSM3 (Estados Unidos), modelos que fueron evaluados previamente a través de sus variables dinámicas y físicas (vientos, presión a nivel del mar, geopotencial, temperatura del aire, humedad relativa) para la región sudamericana, siendo esta información similar al reanálisis del NCAR. Esta información fue verificada a partir de un conjunto de ocho modelos del IPCC provenientes de los Centros Internacionales: BCCR, CCCma, CSIRO, GFDL, MPI-M, NCAR, NIES y UKMO (ver 3.1 y 4.1).

Se hace uso del software estadístico Climpack (Benestad, R. et al., 2007), corrido en plataforma R, para obtener información estimada de cambios en la precipitación y temperatura para la media centrada en el 2030 relativo al período climático observado 1971-2000, en las estaciones andinas representativas de Cusco y Apurímac. Es importante señalar que los cambios de precipitación y temperatura 2030 fueron estimados a partir de la media del período 2016-2044.

Para aplicar el método de downscaling estadístico fue necesario disponer de datos climáticos con control de calidad de *períodos largos (mayor a 30 años) y continuos*. El método de downscaling expuesto se ha evaluado en 10 estaciones meteorológicas, siete de ellas ubicadas en la región Cusco y tres en la región Apurímac (ver figura 4).



Es importante señalar, que las técnicas de regionalización (estadísticas y dinámicas) aplicadas están asociadas a fuentes de incertidumbres, como en el caso del método estadístico donde se acepta la hipótesis de la estacionariedad de “las relaciones entre las variables de gran escala y las variables locales en el clima actual se mantendrían en el futuro cercano”. Por otro lado, “la técnica de regionalización dinámica a través de los Modelos Regionales añaden fuentes de incertidumbre adicionales y similares a los AOGCM con los que son forzados, y algunas específicas propias de la simulación a escala regional como: La incertidumbre en el forzamiento radiativo asociada a la distribución espacio-temporal de aerosoles que tiene una relevancia especial a escala regional debido a la heterogeneidad del forzamiento y la respuesta. Otro aspecto que incide de forma importante en estas escalas regionales son las variaciones en los usos de suelo y el realismo en los modelos de suelo (Brunet, M. et al 2009)”.

En consecuencia, para reducir la incertidumbre en las técnicas de regionalización evaluadas, los resultados de las metodologías y modelos propuestos en el punto 3.2 fueron promediados y expresados en términos de escenarios promedios de precipitación (mm) y temperatura del aire (°C) para el período 2030 en localidades de interés. Asimismo se estimó *los cambios promedios* en la precipitación en % y cambios promedios en la temperatura (°C) relativo al clima actual (clima base 1971-2000) para los trimestres: diciembre-enero-febrero (verano DEF), marzo-abril-mayo (otoño MAM), junio-julio-agosto (invierno JJA) y setiembre-octubre-noviembre (primavera SON) *a escala regional y local*.

Los resultados son mapeados mediante una adecuada combinación de métodos de regresión múltiple y geoestadísticos con soporte del Sistema de Información Geográfica obteniéndose mapas de alta resolución espacial (250 m) para el caso de escenarios de temperaturas máximas y mínimas del aire. Para el caso de los mapas de escenarios de precipitación se ha trazado considerando criterios físicos, de relieve y la dinámica de circulación a escala regional y local, siendo su resolución espacial menor en relación a la temperatura. En cuanto a los *cambios en la temperatura y precipitación* fueron interpolados espacialmente con el método de splines, debido a que a diferencia del método de inversa a la distancia y kriging, no genera ruido en la interpolación (aparición de núcleos ficticios), más bien suaviza el trazado.

3.3.3 Índices de extremos climáticos de temperatura y precipitación

Se ha realizado el análisis de tendencias de los valores extremos de las variables precipitación y temperatura para ver su evolución futura y detección de cambios respecto al clima actual, haciendo uso del programa RClimDex que está basado en la metodología aplicada por Frich et al. 2002. Se ha considerado las tendencias significativas asociadas a un nivel estadístico de confianza del 99% ($p < 0.01$).

Los datos de escenarios de temperatura y precipitación diaria en puntos de observación local (estación meteorológica) evaluados son extraídos de los modelos dinámicos WRF y TL959L60 a través del método de interpolación bilinear. La aproximación BIAS propuesta por Salzmänn, N. et al 2007 es introducida para ajustar las series de tiempo provenientes de los modelos dinámicos con la observación. La cual permite el ajuste en cantidad pero no en frecuencia, introduce el cambio en la variabilidad año por año, manteniendo el ciclo anual. Filtra errores sistemáticos solo a escala mensual y asume que “el modelo en el time slice futuro SCEN simula coherentemente la frecuencia a escala diaria”.

La aproximación BIAS, matemáticamente consiste en la diferencia (para variables como la temperatura) o

la división (para variables como la precipitación) de los promedios mensuales multianuales del time slice de control del modelo (CTRL) y las observaciones (OBS), el cual es incorporado a los datos diarios de escenarios del modelo (SCEN) correspondientes del mes respectivo. La aproximación BIAS para este estudio es complementada con la propuesta por Lenderink et al. 2006. Las ecuaciones son de la forma siguiente:

Temperatura

$$TBIAS = TOBS_{30jmi} - TCTRL_{30jmi} \dots\dots\dots 3$$

Precipitación

$$PPBIAS = PPOBS_{30jmi} / PPCTRL_{30jmi} \dots\dots\dots 4$$

Entonces la serie de tiempo diario ajustada para la variable temperatura (X) del clima actual y futuro se obtiene de la forma siguiente:

$$X \text{ ajustada}_{1ji} = SCEN_{1ji} + TBIAS$$

$$X \text{ ajustada}_{2ji} = SCEN_{2ji} + TBIAS$$

.

.

$$X \text{ ajustada}_{31ij} = SCEN_{31ji} + TBIAS$$

Dónde:

SCEN_{dji}: día_d del mes_j de la variable X en time slice “período de corrida” futuro del modelo_i

CTRL_{30jmi}: promedio del mes_j de la variable X en time slice de control del modelo_i

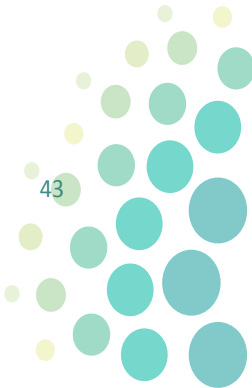
OBS_{30jmi}: promedios del mes de la variable X medidos en estación meteorológica.

De similar manera se obtiene la precipitación ajustada (X) pero considerando PPBIAS.

En consecuencia a las series diarias de temperaturas y precipitación ajustadas procedentes de los modelos TL959L60 y WRF, se adapta la metodología de Frich et al. (2002) y en consecuencia permite obtener los “índices de extremos climáticos futuros”.

En la tabla 5 y 6 se describen los índices de extremos climáticos de la temperatura y precipitación proyectada 2030.

Dos de los índices extremos evaluados que relacionan cambios en la distribución de la precipitación futura son la Precipitación Total Anual en los días húmedos (PRCPTOT) y el índice de Intensidad diaria de precipitación en días húmedos (SDII). Dos relacionan eventos extremos de precipitación futura basados en percentiles: Días muy húmedos (R95p) y Días extremadamente húmedos (R99p). Los índices CDD y CWD indican el número de días secos consecutivos y el número de días húmedos consecutivos, respectivamente. Donde un día húmedo se refiere a días con al menos 1 mm de precipitación.



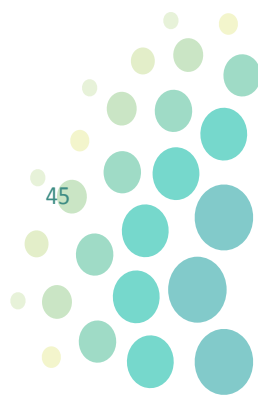
Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
PRCPTOT	Precipitación en días húmedos	Precipitación Total Anual en los días húmedos (RR>=1mm)	Mm
SDII	Índice de intensidad diaria de precipitación	Precipitación total anual dividida por el número de días húmedos en un año	mm día ⁻¹
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR<1mm	días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR>=1mm	días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación total anual en que RR>95 percentil	Mm
R99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación total anual en que RR>99 percentil	Mm

Tabla 5. Índices de precipitación, definición y unidades. Índices calculados anualmente de enero a diciembre

Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
FDO	Días de Heladas	Número de días en un año cuando Tn (mínimo diario) < 0°C	días
Txx	Temperatura máxima <i>máxima</i>	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
Tnn	Temperatura mínima <i>mínima</i>	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
DTR	Rango diurno de temperatura	Diferencia media mensual entre Tx y Tn	°C
Tx10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando Tx < 10th percentil	días
T x90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando Tx > 90th percentil	días
Tn10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando Tn < 10th percentil	días
Tn90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando Tn > 90th percentil	días

Tabla 6. Índices de temperatura, definición y unidades. Índices calculados anualmente de Enero a Diciembre

El consenso basado en la consistencia de la señal de tendencia con significancia estadística al 99% de nivel de confianza de los índices extremos de temperatura resultante de los modelos TL959L60 y WRF es graficada para cada estación de observación. De lo contrario, si no hubo consistencia entre modelos, no se procedió a graficar, debido a la dispersión o divergencia de los resultados asociada a alta incertidumbre. Esta metodología propuesta se aplicó de igual forma para el caso de la precipitación. Finalmente, los “valores” de tendencias fueron dados en términos de promedios.





IV. ESCENARIOS PROYECTADOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN CUSCO Y APURÍMAC

Hemos visto en el capítulo dos, que las proyecciones obtenidas desde los escenarios de cambio climático, están sujetas a una variedad de fuentes de incertidumbres que afectan todos sus procesos, desde el establecimiento de los escenarios alternativos de posible evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles -que afectan el sistema radiativo- hasta la modelización del sistema climático global y la reducción de la escala espacial.

En este capítulo, se explora las incertidumbres en la temperatura y precipitación proyectada por ocho modelos globales, se analiza la circulación atmosférica en su clima actual, y se maneja las incertidumbres asociadas en la reducción de la escala espacial de la proyección obtenida mediante dos técnicas de regionalización: dinámica (modelos regionalizados ECHAM-WRF), y estadística (modelos regionalizados ECHAM5, CCSM3, HadCCM3); y la construcción de escenarios a partir del modelo TL959- MRI/JMA). La confianza de las proyecciones de los escenarios futuros de cambio climático dependerá en cierta medida de qué tan bien el clima actual es simulada por los modelos globales, y qué tan grande es la dispersión entre las simulaciones de los modelos en el clima actual y futuro (Moise et al. 2005). Lambert y Boer, 2001, han observado que cuando se evalúa la raíz del error cuadrático medio (RMSE) del conjunto de modelos climáticos, este tiende a ser más bajo, que los modelos evaluados de forma individual. Asimismo, el conjunto de modelos, se puede utilizar para obtener predicciones más confiables (Tebaldi y Knutti 2007).

En este capítulo, las proyecciones del clima futuro en Cusco y Apurímac, están representadas por la media de las proyecciones del conjunto de modelos regionalizados.

4.1 Explorando las incertidumbres del clima futuro en Cusco y Apurímac

Los cambios en la temperatura y precipitación para el 2030 relativo al periodo 1971-2000; proyectado por ocho diferentes modelos globales disponibles del IPCC SRES AR4 del escenario de emisión A1B, y la incertidumbre científica asociada a la magnitud de la proyección de los cambios, en Cusco y Apurímac, son mostrados en las figuras 6 ,7 y la tabla 7.

Cambios en la Precipitación

La precipitación en el escenario A1B simulado por los diferentes modelos globales muestra variabilidad al 2030 en la figura 6 y tabla 7. Por un lado los modelos de los Centros de Predicción Climática Internacional

NCAR y UKMO proyectan aumentos hasta en 13% en la estación húmeda de verano (DEF) y otoño (MAM), respectivamente. Por otro lado, disminuciones significativas de 25% y 17% son simuladas por los modelos del GFDL y MPI en la estación seca o de estiaje JJA. Sin embargo, existe un mayor acuerdo en la proyección de la precipitación en DEF, MAM y JJA; donde cinco modelos de los Centros BCCR, CSIRO, GFDL, NCAR y UKMO concuerdan que las precipitaciones presentarían ligeros aumentos en la estación DEF pero con valores dentro del umbral superior de la variabilidad normal actual, siendo esta de 15%. Asimismo, cinco modelos concuerdan que las precipitaciones presentarían deficiencias en la estación MAM y principalmente en JJA simuladas por CCCma, BCCR, CSIRO y especialmente por los modelos GFDL y MPI, mostrando estos dos últimos modelos un fuerte gradiente de deficiencias hasta de 25%. Sin embargo, no hay acuerdo entre los modelos en cuanto al área de impacto ya que por un lado GFDL proyecta fuerte deficiencias en la zona sur de ambas regiones y por otro lado MPI en la zona norte, lo cual es comprensible dada la baja resolución de los modelos.

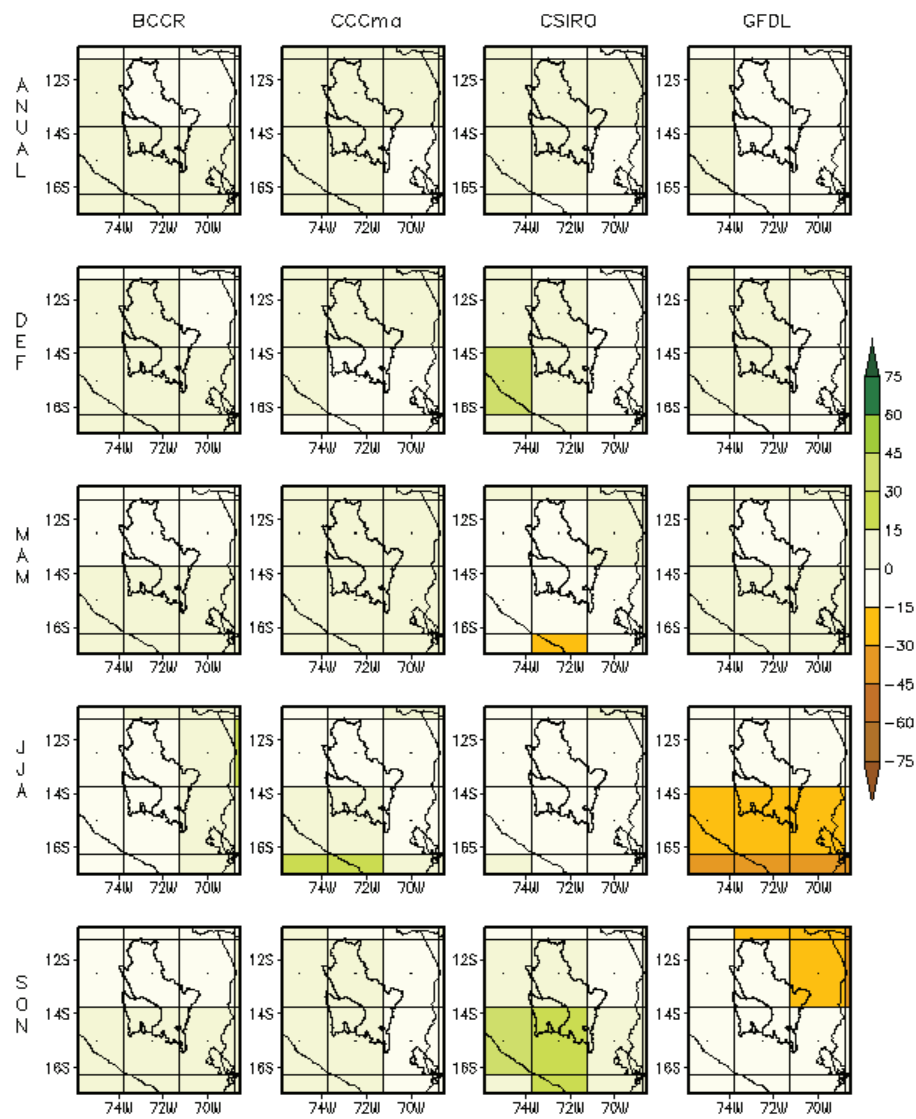
Cambios en la Temperatura

Todos los modelos muestran consistencia en el aumento de la temperatura en todas las escalas temporales (anual y estacional) pero con diferencias en cuanto a su magnitud a pesar de estar simuladas con un mismo escenario de emisión antrópica A1B; siendo el escenario de menor magnitud de calentamiento simulada por CSIRO de 0.7°C en verano en todo el ámbito espacial de Cusco y Apurímac y la mayor magnitud de calentamiento de 1.9°C por el modelo CCCma en invierno, ver figura 7. Mientras la magnitud moderada de calentamiento es simulada por MPI desde 1°C en verano hasta 1.7°C en invierno. Las diferencias entre las magnitudes proyectadas por los distintos modelos AOGCM podrían residir en su distinta resolución espacial, la formulación matemática de las ecuaciones dinámicas y los diferentes procesos de retroalimentación superficie terrestre-atmósfera-océano (mar-hielo) y también en la relativa habilidad de definir adecuadamente la señal antropogénica.

Es importante señalar que el acuerdo entre los modelos globales “no prueba” que todo está correcto, se debe realizar un análisis más detallado de las variables océano atmosféricas en la simulación de control (clima actual) de los AOGCMs, para determinar qué modelo tiene mejor performance en su capacidad predictiva y bajo esta hipótesis “también lo será en el clima futuro”. Más adelante se presenta los modelos regionalizados a 20 Km y a escala local como la mejor opción de resolución para mostrar los cambios del clima a mayor detalle en Cusco y Apurímac.

CENTRO DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA MODELOS GLOBALES Resolución 250 km	BCCR	CCCma	CSIRO	GFDL	MPI	NCAR	NIES	UKMO
	BCM2.0	CGCM3	Mk3.0	CM2.1	ECHAM5-OM	CCSM3	MIROC3.2m	HadCM3
Δ CAMBIOS EN LA TEMPERATURA (°C)								
ANUAL	0.9	1.6 - 1.8	0.8	1.3 - 1.4	1.3 - 1.4	1.5	1.5 - 1.8	1.4 - 1.5
DEF	0.9 - 1.0	1.5 - 1.9	0.7	1.0 - 1.1	1.0 - 1.2	1.4	1.7 - 1.8	1.2 - 1.3
MAM	0.9	1.5 - 1.6	0.8 - 0.9	1.2 - 1.3	1.3 - 1.4	1.4 - 1.6	1.4	1.3
JJA	0.8 - 0.9	1.7 - 1.9	0.8	1.4 - 1.5	1.7	1.6 - 1.7	1.5 - 1.6	1.4 - 1.6
SON	0.8 - 1.0	1.6 - 2.0	0.6 - 0.8	1.6 - 2.0	1.0 - 1.2	1.4 - 1.6	1.4 - 1.6	1.4 - 1.8
Δ CAMBIOS EN LA PRECIPITACIÓN (%)								
ANUAL	-2 a 2	2	1	0 a -3	0 a -2	10 a 12	-2 a -5	5 a 7
DEF	0 a 2	-1 a 3	1 a 5	0 a 1	0 a 2	-1 a 1	7 a 13	-2 a -4
MAM	-4 a 1	4 a 5	-1 a -11	-1 a 2	-2 a -6	6 a 15	-3 a -5	4 a 13
JJA	-2 a 0	-1 a 3	-3 a -9	-13 a -25	-6 a -17	2 a 2	10 a 22	8 a 9
SON	-2 a 3	0 a 1	4 a 16	-4 a 10	3	10 a 13	-2 a -6	-3 a 13

Tabla 7: Modelos evaluados del IPCC y cambios proyectados en la temperatura media (°C) y precipitación (%) promedio anual y estacional para las regiones Cusco y Apurímac



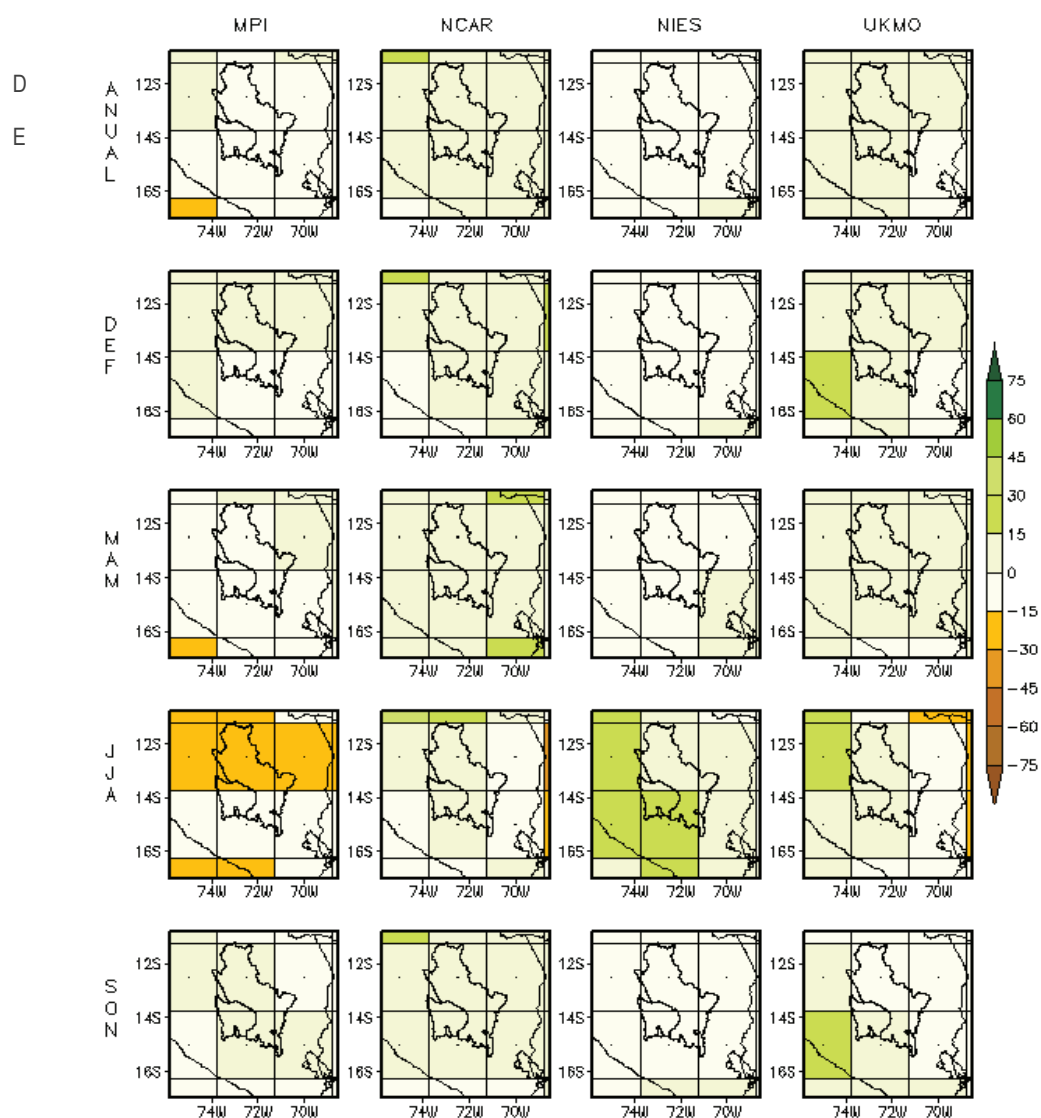
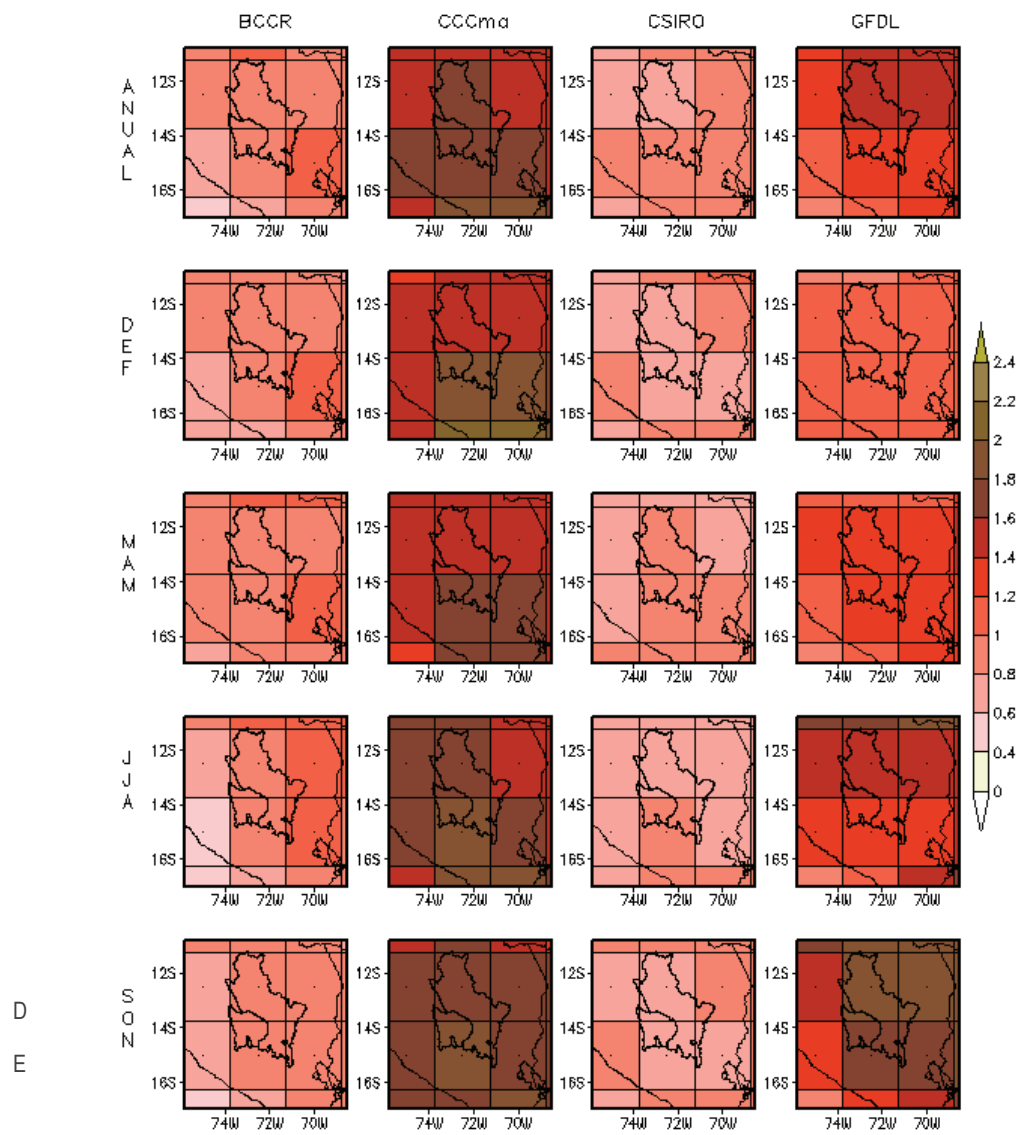


Figura 6: Cambios en la precipitación 2030 (%) relativo a 1971-2000, a nivel anual y estacional (verano-DJF, otoño-MAM, invierno JJA, primavera-SON).



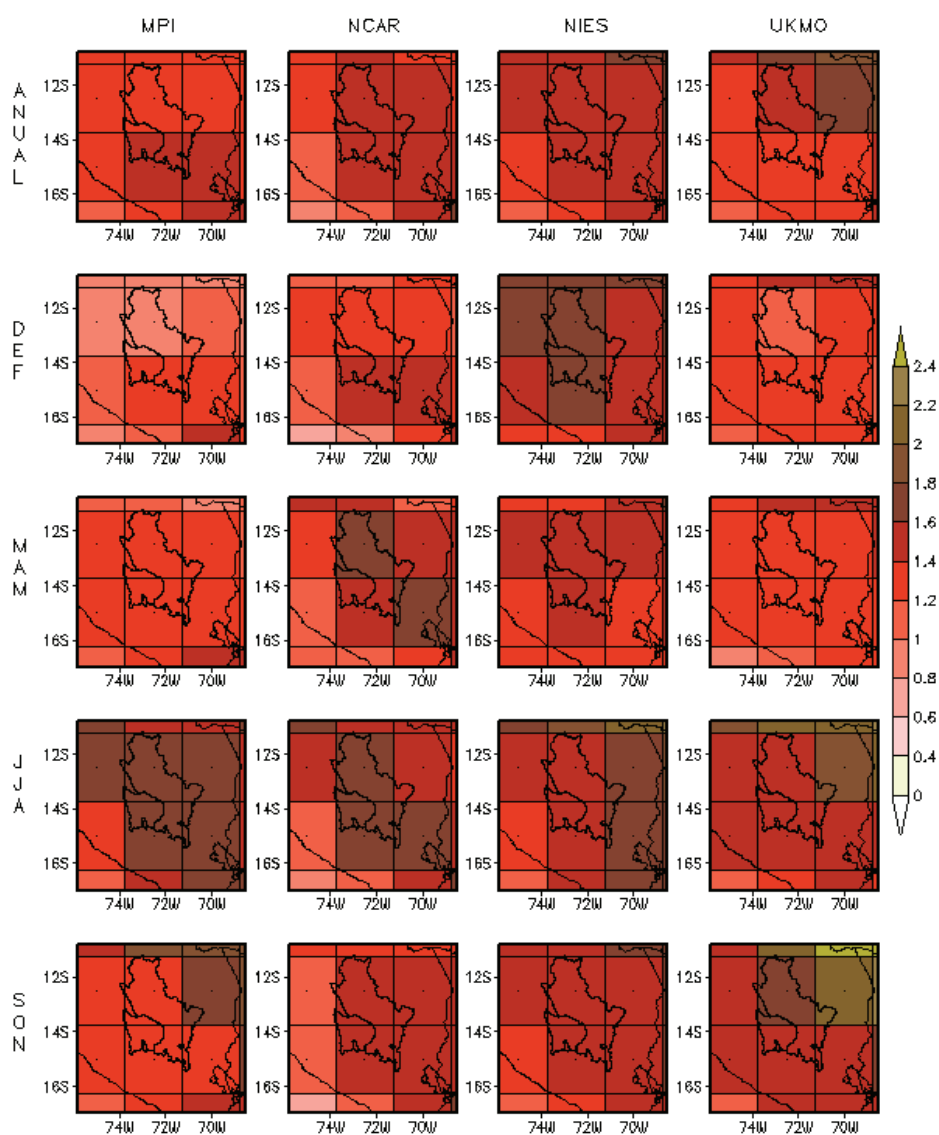


Figura 7: Cambios en la temperatura media 2030 (°C) relativo a 1971-2000, a nivel anual y estacional (verano-DJF, otoño-MAM, invierno JJA, primavera-SON).

4.2 Intercomparación de modelos

4.2.1 Modelos globales

Los principales sistemas atmosféricos de gran escala responsables del clima en la región Sudamericana y como consecuencia de las regiones Cusco y Apurímac; son la Alta de Bolivia (AB), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la Zona de Convergencia Atlántico Sur (ZCAS), el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y Atlántico Sur (AAS). En las figuras 8-15 se muestran los campos promedios y bias (errores) de la presión atmosférica a nivel del mar, vientos, humedad, precipitación obtenidos de los reanálisis y de ocho AOGCMs para verano e invierno.

En el verano (DEF) del hemisferio sur, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y el Anticiclón de Atlántico Sur (AAS), dos factores climáticos fundamentales del campo de la presión a nivel del mar son representados de forma coherente por los modelos ECHAM5-OM, CCSM3 y MIROC3.2, así como su posición latitudinal alrededor de 30°S.

En invierno, los sistemas de presión APS y AAS, se observan al norte de 30°S y más cercano a las costas; esto puede visualizarse en los modelos evaluados principalmente en HadCM3, ECHAM5, CCSM3, MK3.0, CM2.1.

En general, en verano e invierno los modelos no muestran limitación en proyectar la magnitud del APS lo cual puede reflejarse a través de los valores de bias de ± 1 hPa en la figura 8 (a y b), principalmente en ECHAM5-OM y CCSM3. Respecto a la magnitud de la isobara central del AAS gran parte de los modelos muestran discrepancias, observándose valores de bias hasta de 9 hPa en CGCM3.

Los menores bias en el campo de la presión a nivel del mar son observados en verano en los modelos ECHAM5-OM, CCSM3, MIROC3.2 sobre el pacífico y atlántico, y los mayores bias en invierno en los modelos CGCM3, MIROC3.2, Mk3.0 principalmente al sur del continente asociada a la intensificación de ciclones extratropicales, que forman un fuerte gradiente isobárico en esta región.

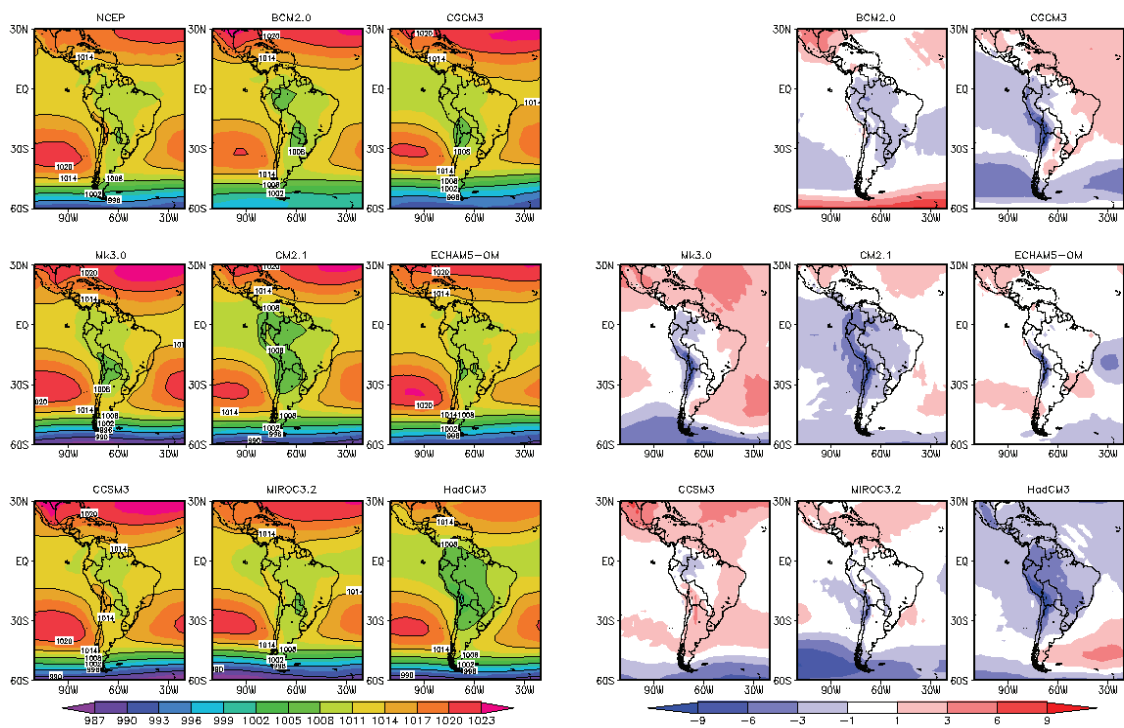


Figura 8a. Presión a nivel del Mar (PSL). Posición, configuración e intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y Atlántico Sur (AAS). Información de reanálisis y simuladas por modelos del IPCC (izquierda). Bias (derecha). Línea base climática para verano (DEF) 1971-2000.

PSL

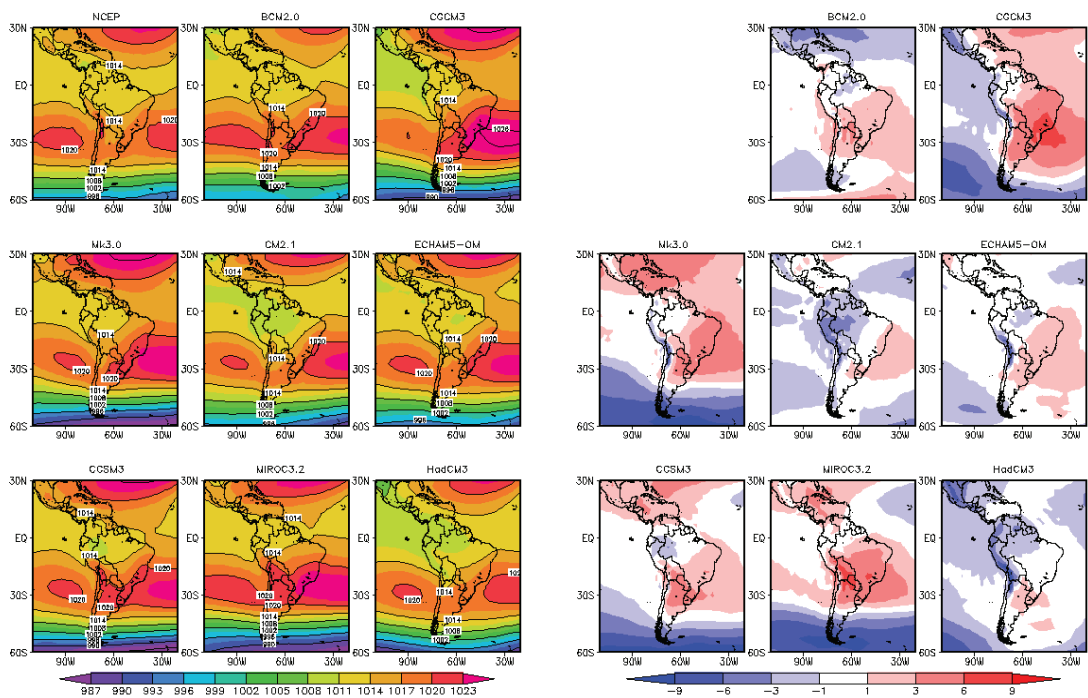


Figura 8b. Presión a nivel del Mar (PSL). Posición, configuración e intensidad del Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y Atlántico Sur (AAS). Información de reanálisis y simuladas por modelos del IPCC (izquierda). Bias (derecha). Línea base climática para invierno (JJA) 1971-2000.

En cuanto a la distribución espacial en el verano de la ZCIT *sobre continente y el océano Atlántico*, evaluada a través de la variable precipitación; en general la ZCIT es mejor representada por BCM2, MK3.0, CM2.1, MIROC3.2 y HadCM3 similar a reanálisis de fuente CMAP. En tanto *la ZCIT sobre el océano pacífico*, el modelo HadCM3 configura coherentemente su posición en verano; a diferencia del resto de modelos (BCM2, CGCM3, MK3, ECHAM5-OM y CCSM3) que configuran dos bandas una en cada hemisferio; en el clima actual se forma una banda nubosa en los meses de febrero y marzo.

En invierno la mayoría de modelos analizados, especialmente HadCM3 y ECHAM5-OM configuran bien³ la posición de la ZCIT desplazada al norte, coherente con la precipitación asociada, la cual puede visualizarse en la climatología 1971-2000 en la figura 9 (a y b).

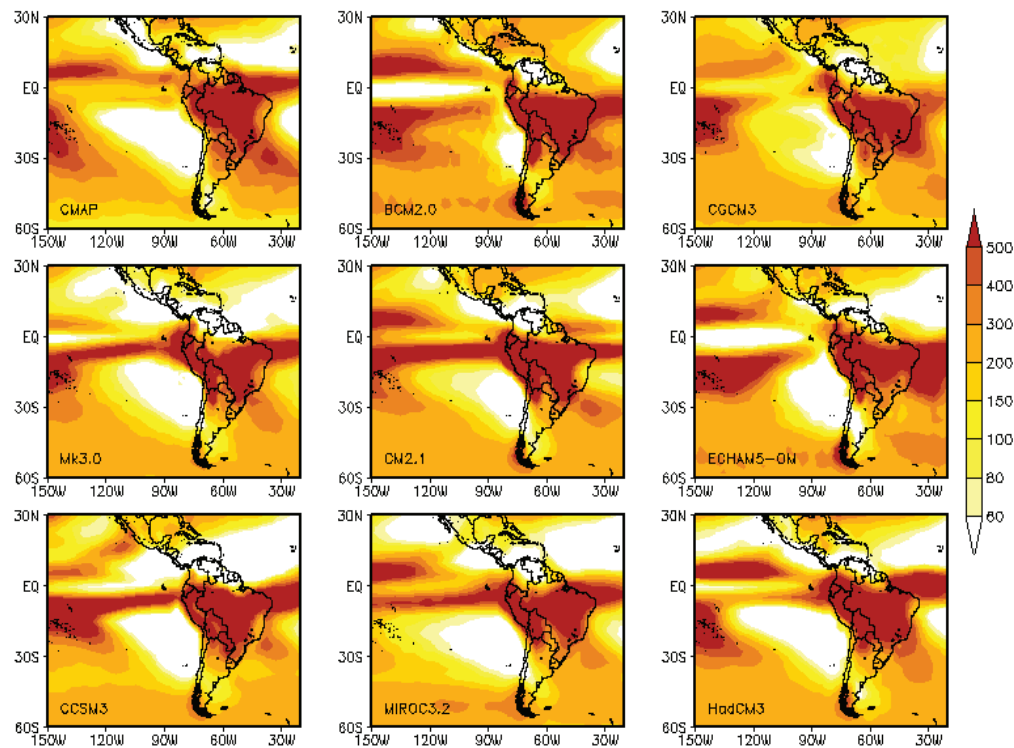
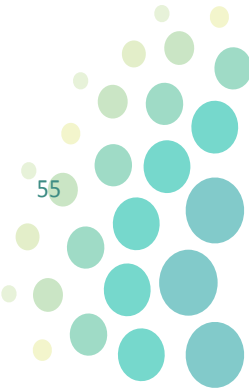


Figura 9a. Precipitación. Posición y configuración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en verano (DEF). Información de reanálisis (Fuente CMAP) y simuladas por diferente modelos del IPCC. Línea base climática 1971-2000.

3



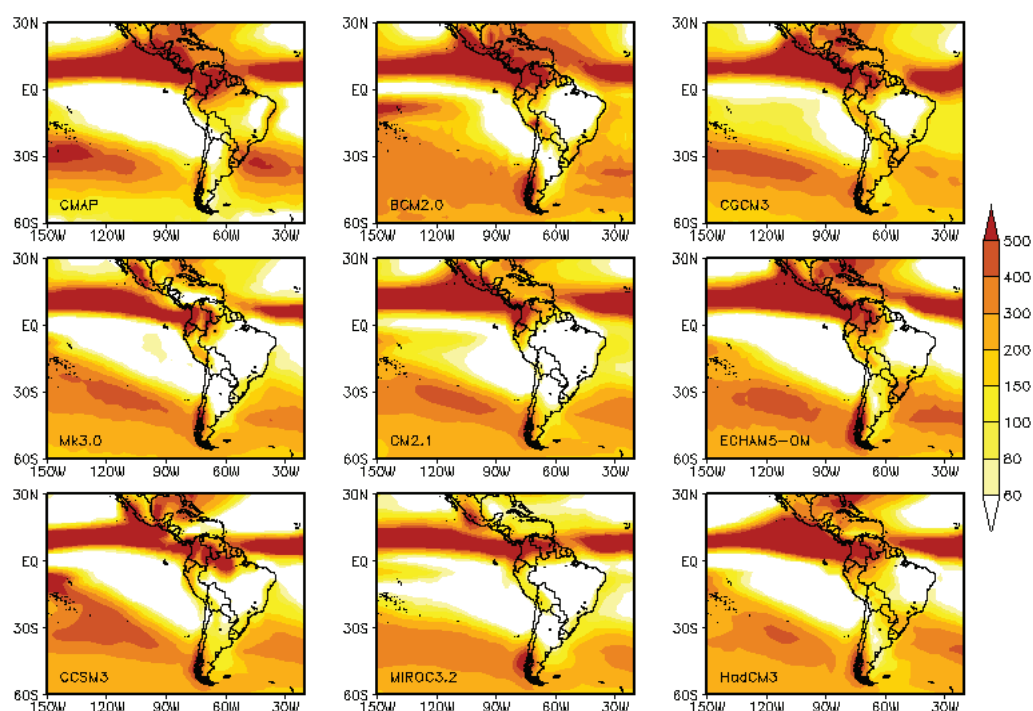


Figura 9b. Precipitación. Posición y configuración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en invierno (JJA). Información de reanálisis y simuladas por diferente modelos del IPCC. Línea base climática 1971-2000.

En verano, la circulación de viento a gran escala dominante a 11 Km de altura es de giro anticiclónico denominada Alta de Bolivia (AB) centrado en 17°S 70°W con flujos predominantes del este hasta 21°S, la cual es responsable de la ocurrencia de precipitaciones importantes en Cusco y Apurímac, está representada coherentemente por los modelos CGCM3, ECHAM5-OM, CCSM3, HadCM3.

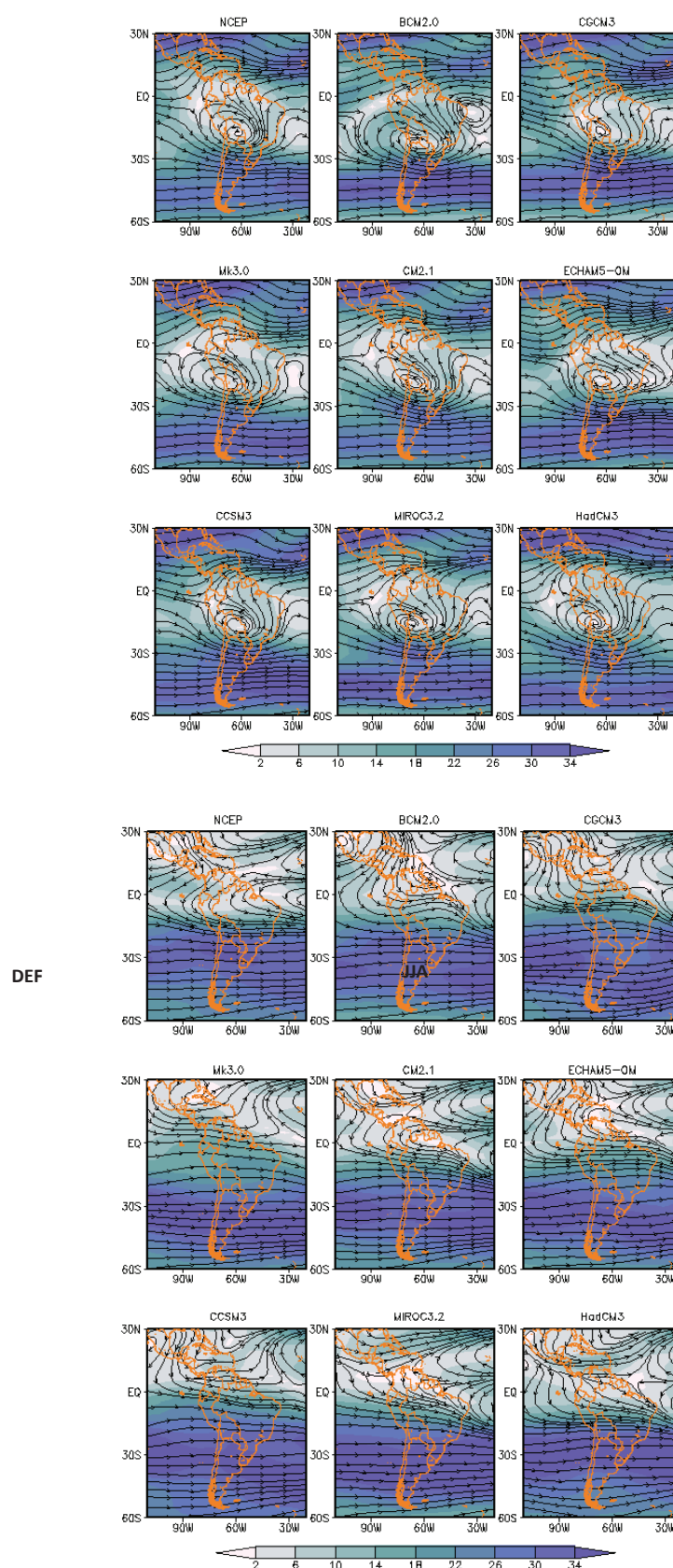


Figura 10. Patrones de circulación de viento a 11 Km (líneas de corriente a 200 hPa) para verano DEF (período lluvioso) e invierno JJA (período de estiaje) – reanálisis NCEP y simulaciones de ocho modelos globales del IPCC- AR4. Línea base climática (1971-2000).

En invierno la AB se desconfigura y predominan los vientos del oeste que limitan la precipitación en las regiones de estudio, los vientos del este se restringen al norte de los 10°S. Este comportamiento es mejor representada por los modelos ECHAM5-OM y HadCM3, siendo similar a la climatología (reanálisis de NCEP) la cual se aprecia en la figura 10. El resto de modelos muestran vientos oestes incluso al norte de la línea ecuatorial debido a sus diferentes formulaciones dinámicas.

De siete variables evaluadas estadísticamente (presión a nivel del mar, altura geopotencial, temperatura del aire, precipitación, vientos, humedad relativa y temperatura superficial del mar), las variables temperatura del aire, altura geopotencial a 11 Km (200 hPa) y la TSM son las que presentan mejores valores de correlación de anomalías y error cuadrático medio (RMSE) sobre continente sudamericano, el pacífico y atlántico tropical, ver figuras 11 (a, b) – 13 (a, b). Siendo los mejores modelos, que presentan mayores áreas de correlación positiva (0.2 a 0.6) y menor RMSE (0 a 48) el HADCM3, ECHAM5 y CCSM3 seguido del modelo CGCM3. Se considera que el modelo CCSM3 al tener mejor representación en la variable temperatura del aire a ~5 km (500 hPa), mayor área de correlación positiva y menor RMSE sobre territorio peruano, estadísticamente es el tercer modelo que está más cerca de la información de reanálisis, en tanto el resto de modelos globales (Mk3.0, CM2.1, MIROC3.2, BCM2) presentan cierta limitación que es visible en sus simulaciones.

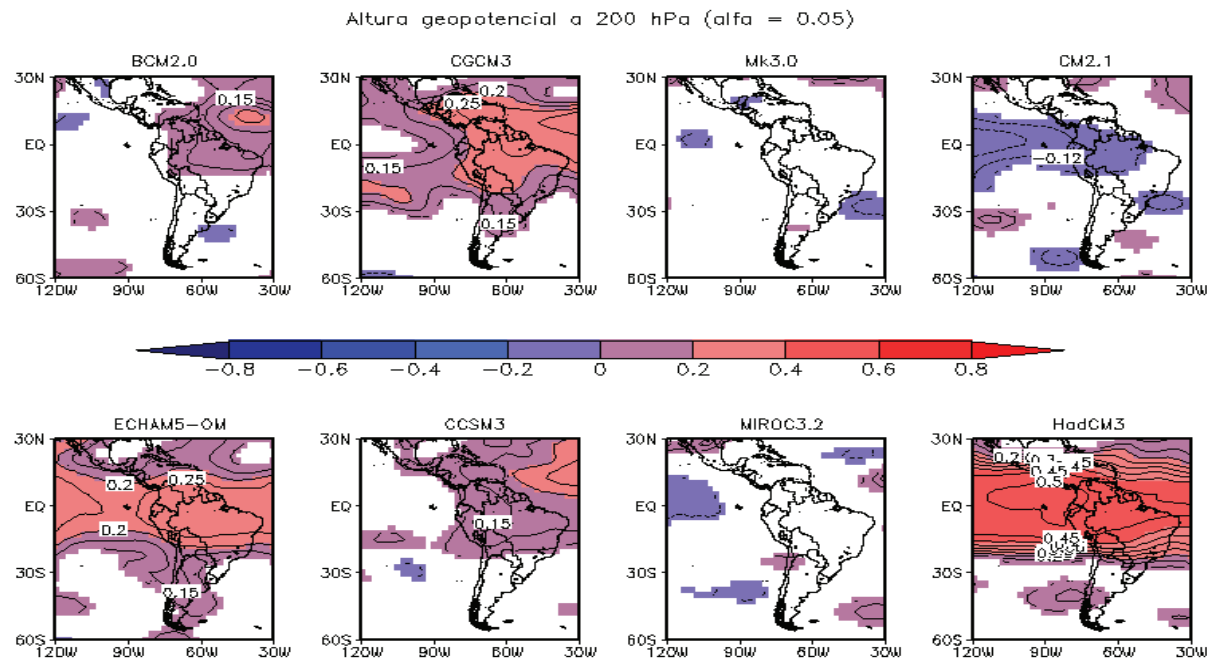


Figura 11a. Correlación de Anomalías de Altura Geopotencial a 11 Km (200 hPa) asociada al nivel de significancia estadística de 0.05 en colores y líneas de contorno. El color blanco indica bajo nivel de significancia. Línea base climática 1971-2000.

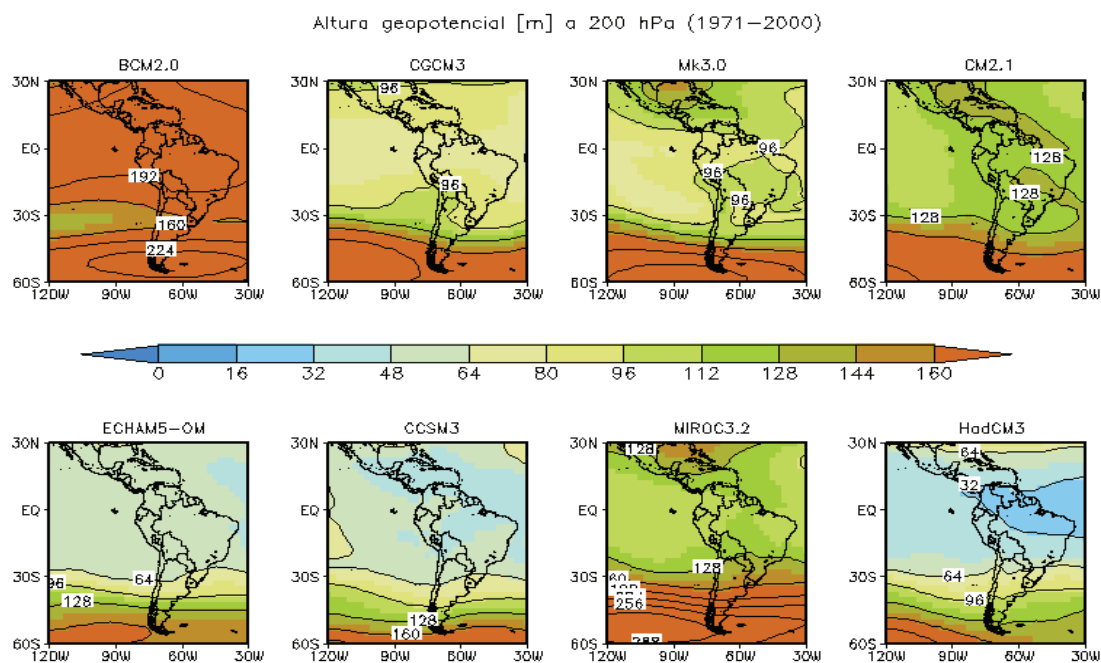


Figura 11b. Error Cuadrático Medio (RMSE) de la Altura Geopotencial a 11 km de altura (200 hPa)

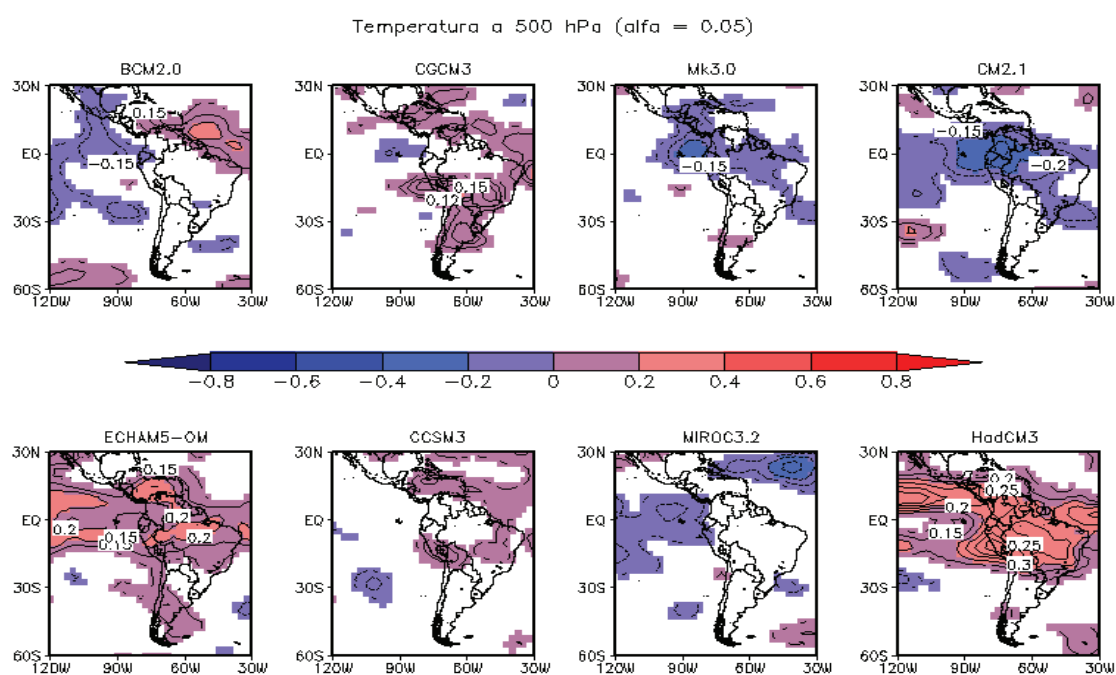


Figura 12a. Correlación de Anomalías de Temperatura del aire a 5 Km (500 hPa) asociada al nivel de significancia estadística de 0.05 en colores y líneas de contorno. El color blanco indica bajo nivel de significancia. Línea base climática 1971-2000.

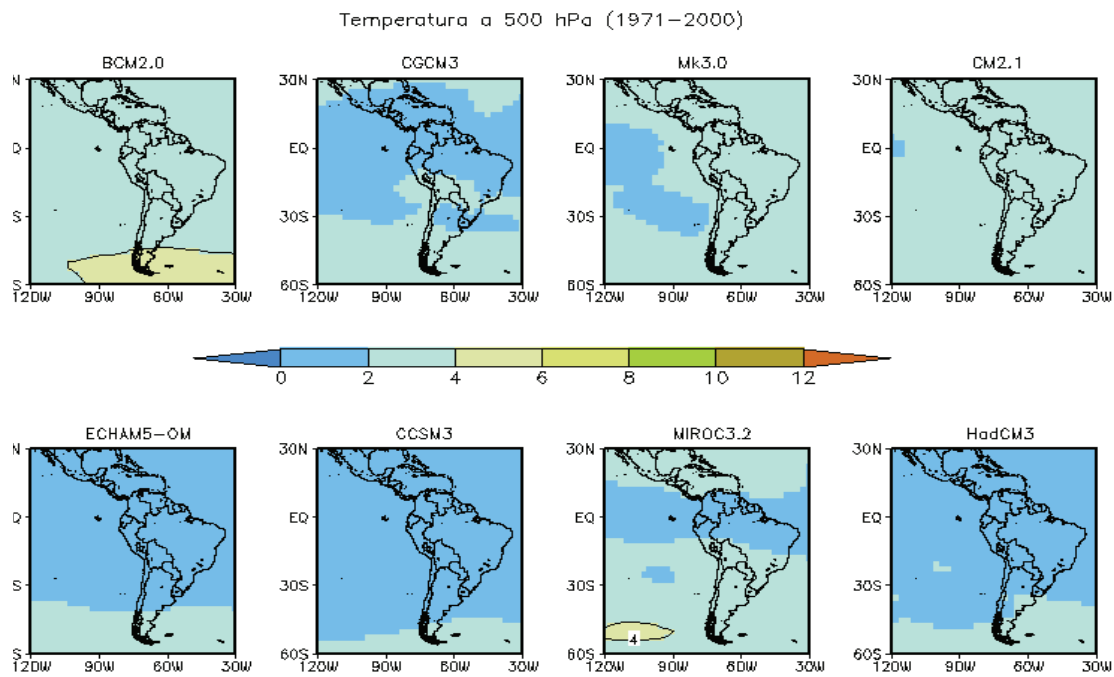


Figura 12b. Error Cuadrático Medio (RMSE) de la Temperatura del aire a 5 Km (500 hPa).

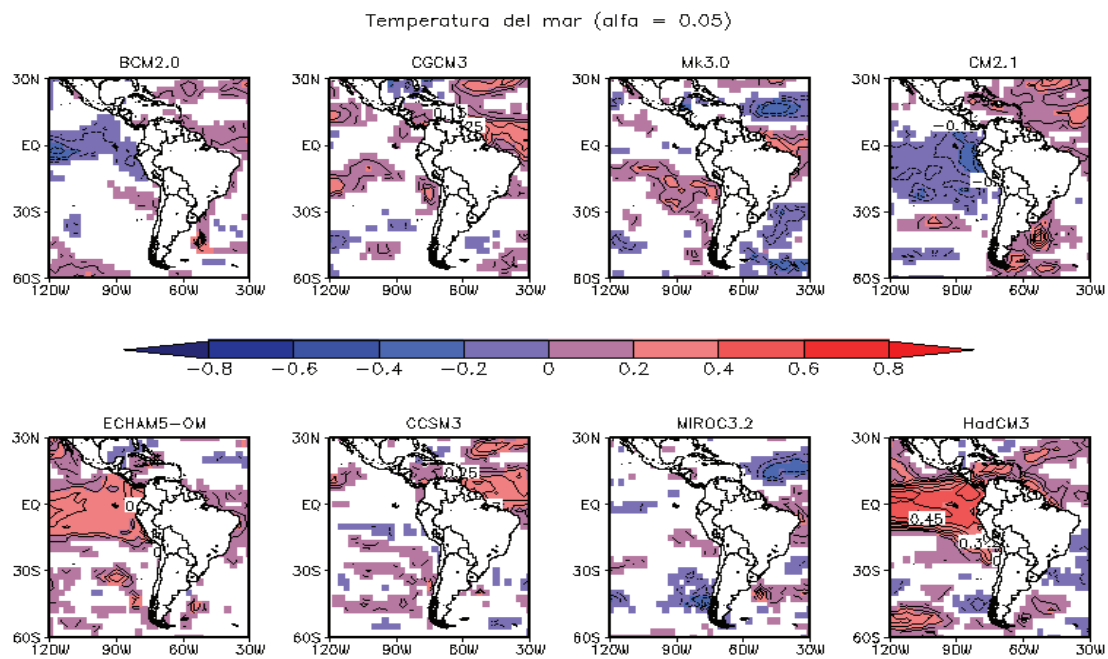


Figura 13a. Correlación de Anomalías de Temperatura Superficial del Mar promedio anual asociada al nivel de significancia estadística de 0.05 en colores y líneas de contorno. El color blanco indica bajo nivel de significancia. Línea base climática 1971-2000.

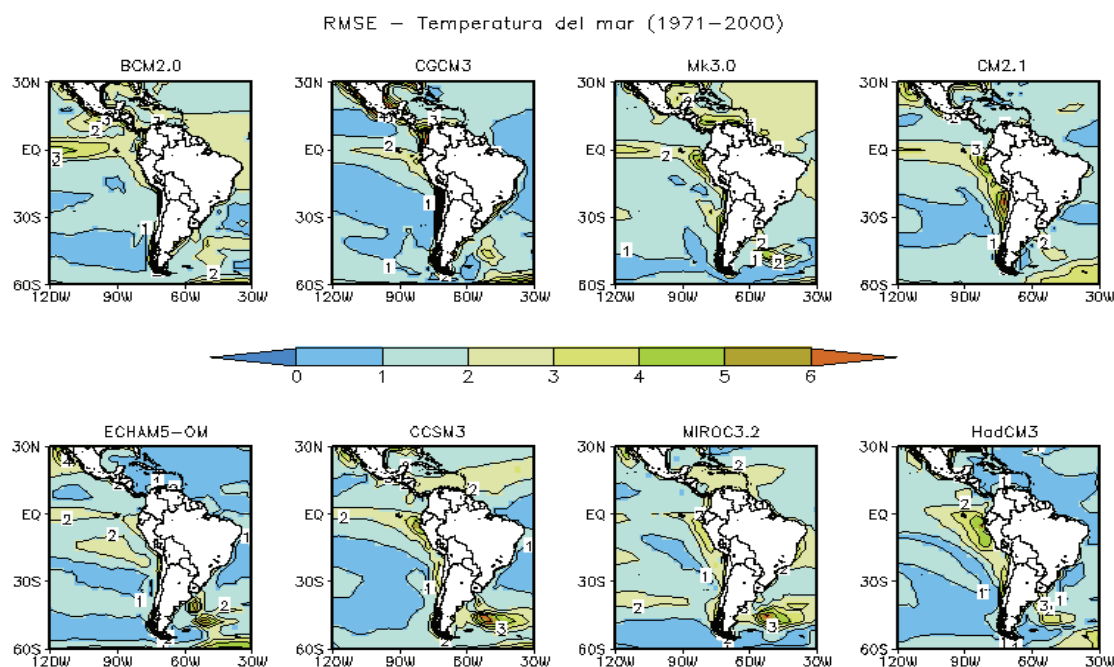


Figura 13b. Error Cuadrático Medio (RMSE) de la Temperatura Superficial del Mar.

La figura 14a muestra la circulación atmosférica del mes de julio 1997 (invierno de El Niño 1997-98) sobre el continente sudamericano, reflejado en el comportamiento del viento a 1.5 km (850 hPa) y anomalía del espesor de la columna atmosférica entre 1.5-11 Km (850-200 hPa) provenientes de las simulaciones de control de los modelos HadCM3, ECHAM5, CCSM3 y la información climática de reanálisis ERA40. Todos los modelos muestran la incursión de vientos de componente este provenientes del Atlántico, sobre el norte del continente; la predominancia de anomalías positivas en espesores asociado a calentamiento con la expansión de la columna atmosférica en gran parte de la región tropical sobre el océano y parte del continente (entre 20°N y 20°S); aunque con diferente magnitud y configuración, donde el modelo HadCM3; muestra mayor coherencia con el reanálisis ("información real"). En tanto, ECHAM5 sobrestima la expansión de la columna atmosférica a diferencia del CCSM3. Asimismo, se observa anomalías negativas (enfriamiento) en latitud de 40°S asociadas a la compresión de la columna atmosférica simulada razonablemente por el modelo HadCM3.

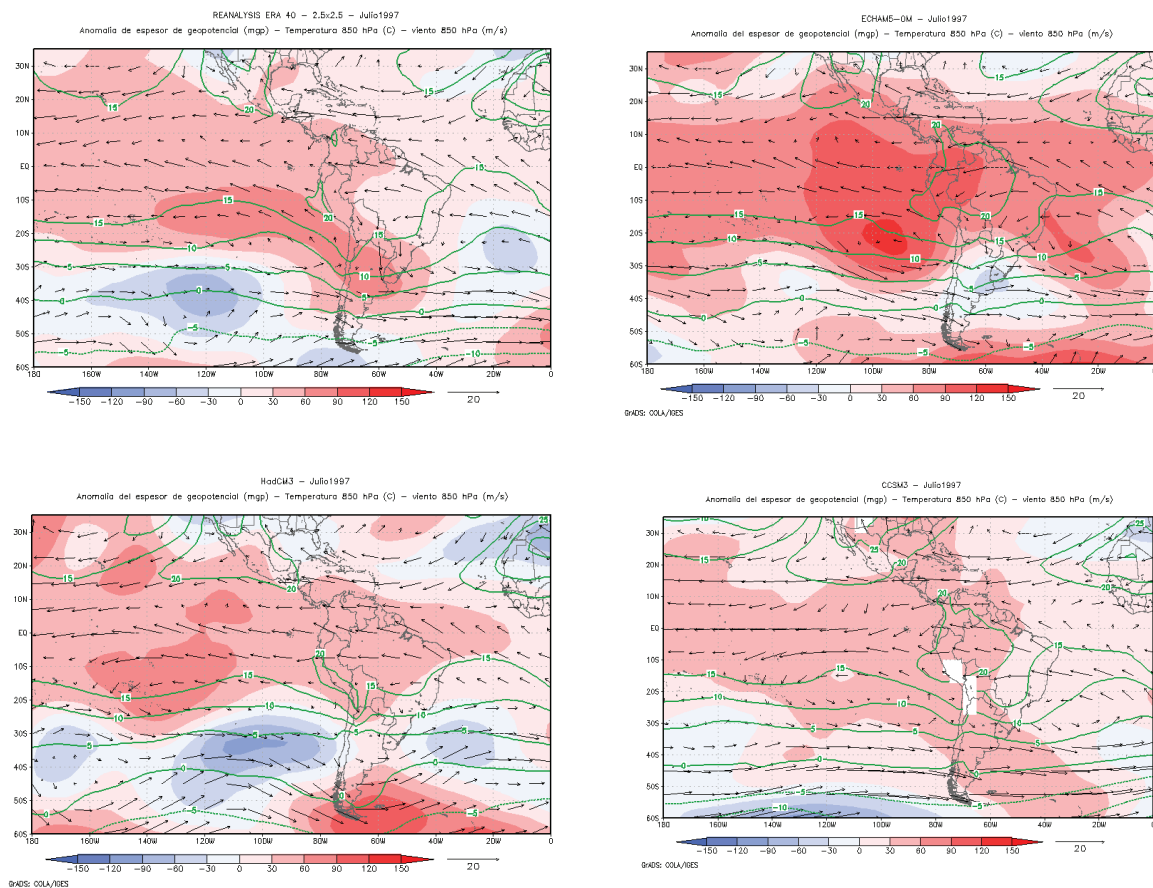


Figura 14a: Temperatura del aire y Vientos a 1.5 km (850 hPa), anomalía de espesores 1.5 - 11 km (850-200 hPa) asociada a calentamiento (enfriamiento) con expansión (compresión) de la columna atmosférica, respectivamente. Mes julio 1997 (Invierno de El Niño 1997-98).

Para el caso de febrero 1998 (verano de El Niño 1997-1998), los vientos simulados sobre el continente por ECHAM5-OM, CCSM3 y principalmente el HadCM3, presentan un comportamiento coherente al reanálisis ERA 40. Respecto al calentamiento en la columna atmosférica reflejado con la expansión de esta, el mayor calentamiento se ubica sobre el Pacífico oriental, ver figura 14b. Siendo simulado razonablemente por HadCM3 seguido de ECHAM5-OM. Mientras el CCSM3 presenta cierta limitación. De otro lado existe una región de enfriamiento sobre el pacífico sur oriental que sumado al calentamiento observado en la región norte del pacífico, le da la característica de comportamiento bipolar que es simulado en pequeña escala por HadCM3.

En líneas generales la anomalía de espesor entre 1.5 - 11 Km asociada a calentamiento con expansión de la columna atmosférica y la circulación de vientos sobre el territorio peruano, es simulada por los tres modelos aunque con diferente magnitud.

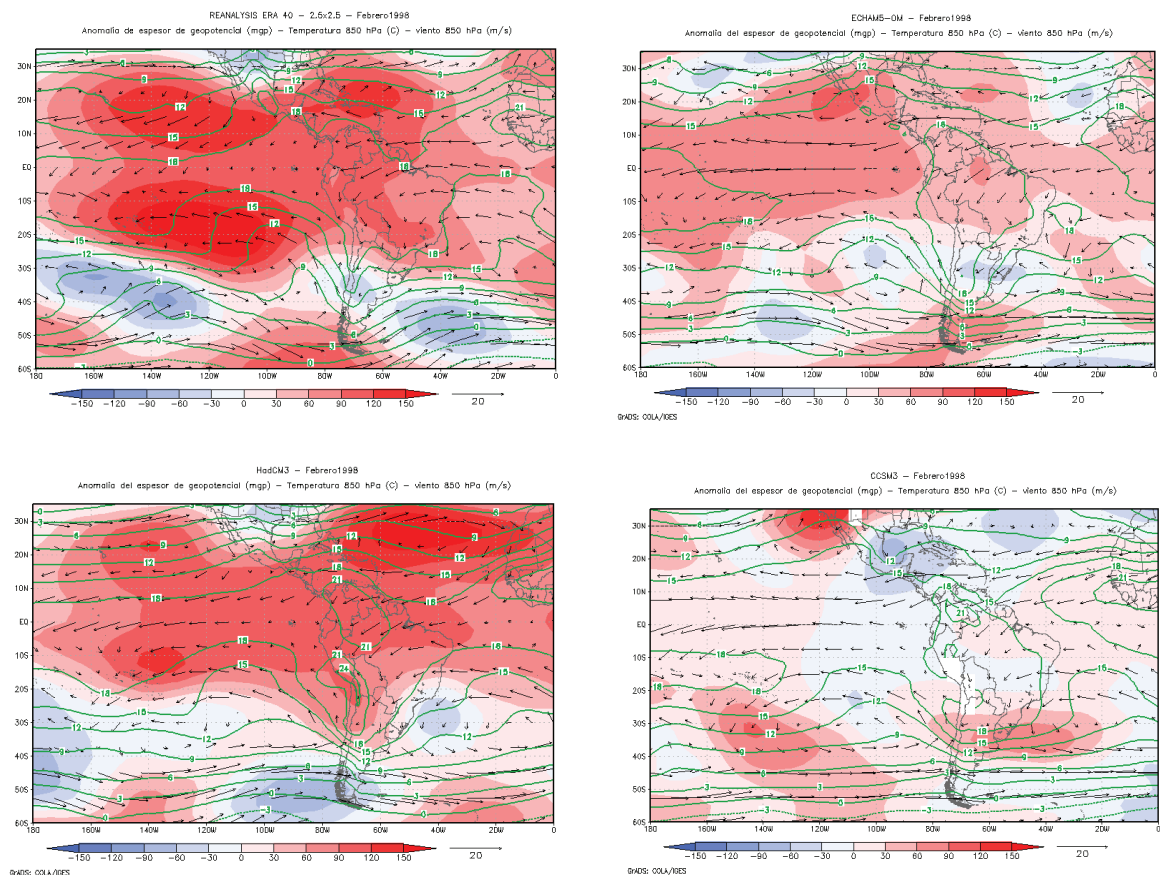


Figura 14b: Temperatura del aire y Vientos a 1.5 km (850 hPa), anomalía de espesores 1.5 – 11 km (850-200 hPa) asociada a calentamiento (enfriamiento) con expansión (compresión) de la columna atmosférica, respectivamente. Mes febrero 1998 (Verano de El Niño 1997-98).

Como consecuencia de la intercomparación de modelos evaluados del IPCC AR4 los modelos HadCM3, ECHAM5-OM y CCSM3 son los que representan razonablemente las variables temperatura del aire, TSM, Altura Geopotencial y viento, cercanas a la información de reanálisis “climatología” en la región de estudio, viéndose reflejado en sus simulaciones de control.

Otro modelo global validado en *su versión actual* a través de sus variables dinámicas para la región sudamericana es el modelo MACG TL959L60 MRI/JMA de 20Km de resolución espacial, este modelo configuró en verano e invierno razonablemente bien la presión a nivel del mar, la circulación de la Alta de Bolivia y el desplazamiento hacia el sur y norte de la ZCIT, los resultados se muestran en la figura 15 (a, b y c).

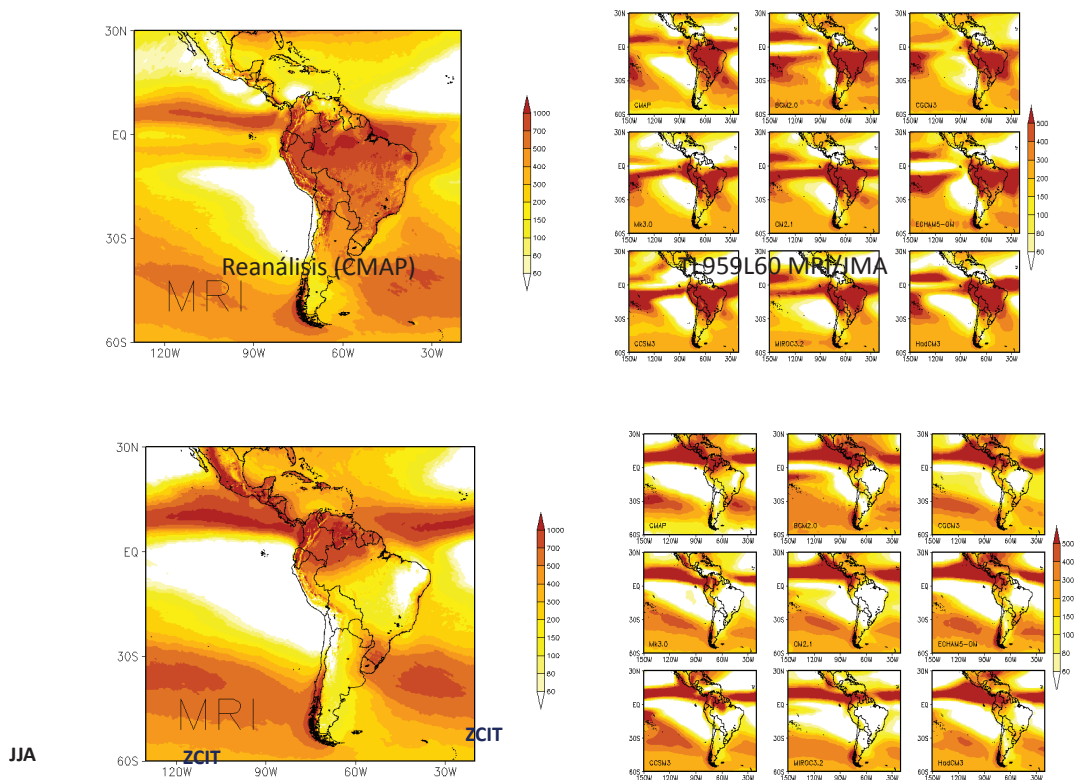


Figura 15a. Precipitación (mm/trimestre). Posición y configuración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en verano e invierno (JJA). Información de reanálisis Fuente CMAP y simulada por el modelo japonés TL959L60 MRI/JMA. Línea base climática 1971-2000.

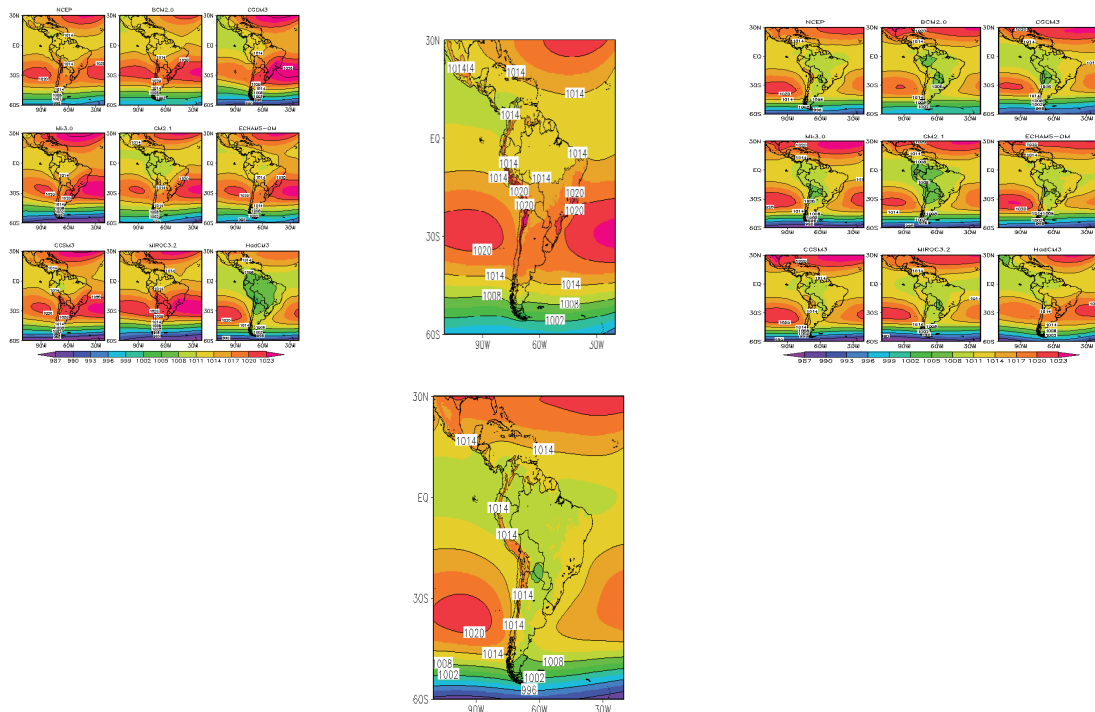


Figura 15b. Presión a nivel del mar (hPa) en verano (DEF) e invierno (JJA) Modelo TL959L60 (20 Km de Resolución) y reanálisis (Fuentes: PP CMAP, PSL NCAR). Línea base climática 1971-2000.

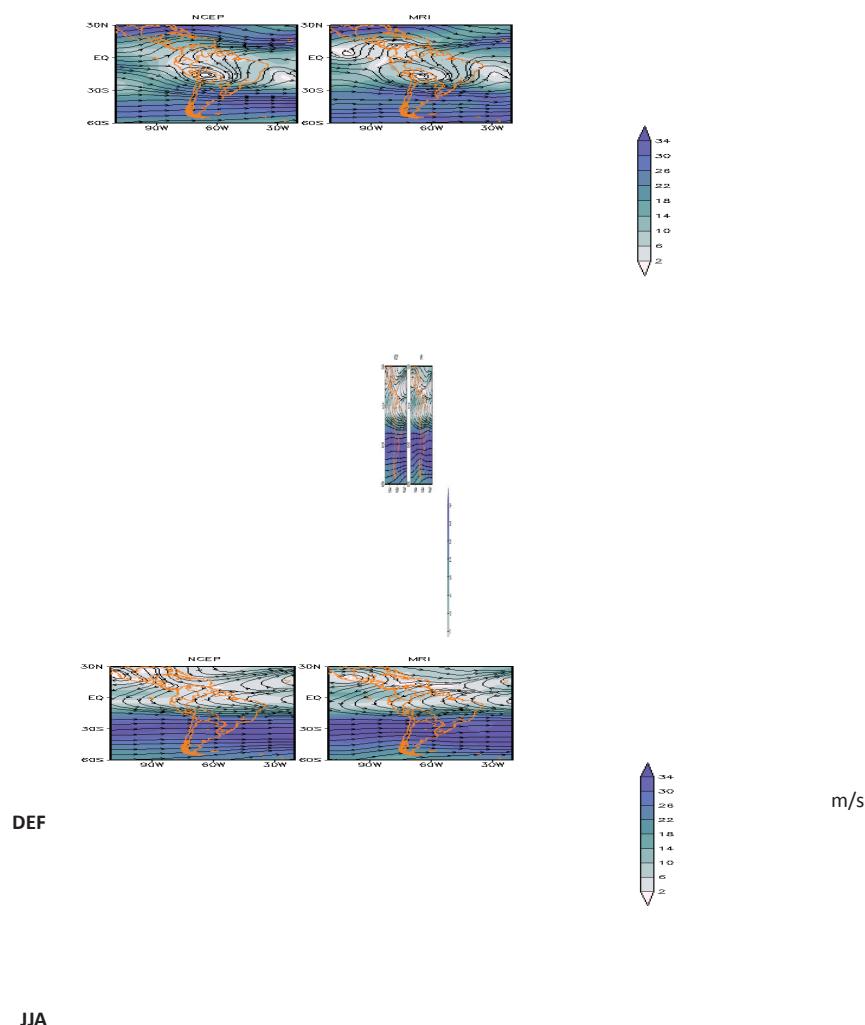


Figura 15c. Patrones de circulación viento a 11 Km (líneas de corriente a 200 hPa) para verano DEF e invierno JJA (60 Km de Resolución) modelo TL959L60 MRI/JMA y reanálisis NCEP. Línea base climática (1979-2000).

4.2.2 Modelo regional para Cusco y Apurímac

El modelo de escala regional atmosférico evaluado para las simulaciones de control y evolución futura del clima en Cusco y Apurímac fue el WRF 3.2. Este modelo fue forzado con la simulación de gran escala del modelo global acoplado ECHAM5-OM, debido a que estuvo entre los tres modelos globales que mejor representan la circulación atmosférica en Sudamérica (ver 4.2).

En la figura 16 se muestra la validación del modelo regional atmosférico WRF en sus variables temperatura del aire y precipitación en la escala temporal anual 1971-2000, en estaciones andinas representativas de la región Cusco (Yauri, Granja Kcayra y Sicuani) y Apurímac (Chalhuanca, Curahuasi y Andahuaylas). Se observa la marcada estacionalidad de la precipitación y temperatura mínima del aire con períodos bien definidos de mínimos y máximos valores (en azul); es simulada en general coherentemente por el modelo WRF (en rojo); a pesar de la sobrestimación de la precipitación en los meses de octubre a diciembre (período de inicio de lluvias) y subestimación de la temperatura mínima de enero a marzo (período de mayores lluvias).

La temperatura máxima observada muestra comportamiento variable en su ciclo anual (en azul) con valores máximos en mayo y octubre, y mínimos en febrero y junio en las estaciones analizadas, este comportamiento es simulado por WRF pero los valores son subestimados entre 2 y 4°C, respectivamente.

Los valores de sobrestimación y subestimación (bias y errores sistemáticos del modelo) en las variables evaluadas, son considerados y tomados en cuenta cuando se ajustan estadísticamente los datos de la simulación futura.

En base a lo analizado se puede inferir que el modelo WRF muestra habilidad en simular la precipitación y temperatura mínima del aire principalmente en otoño, invierno y verano. De otro lado, a pesar de que muestra poca habilidad en primavera, su variación temporal en esta estación del año es coherentemente representada. Con respecto a la temperatura máxima, el modelo presenta habilidad en primavera, verano, invierno, y poca en otoño, ver figura 16.

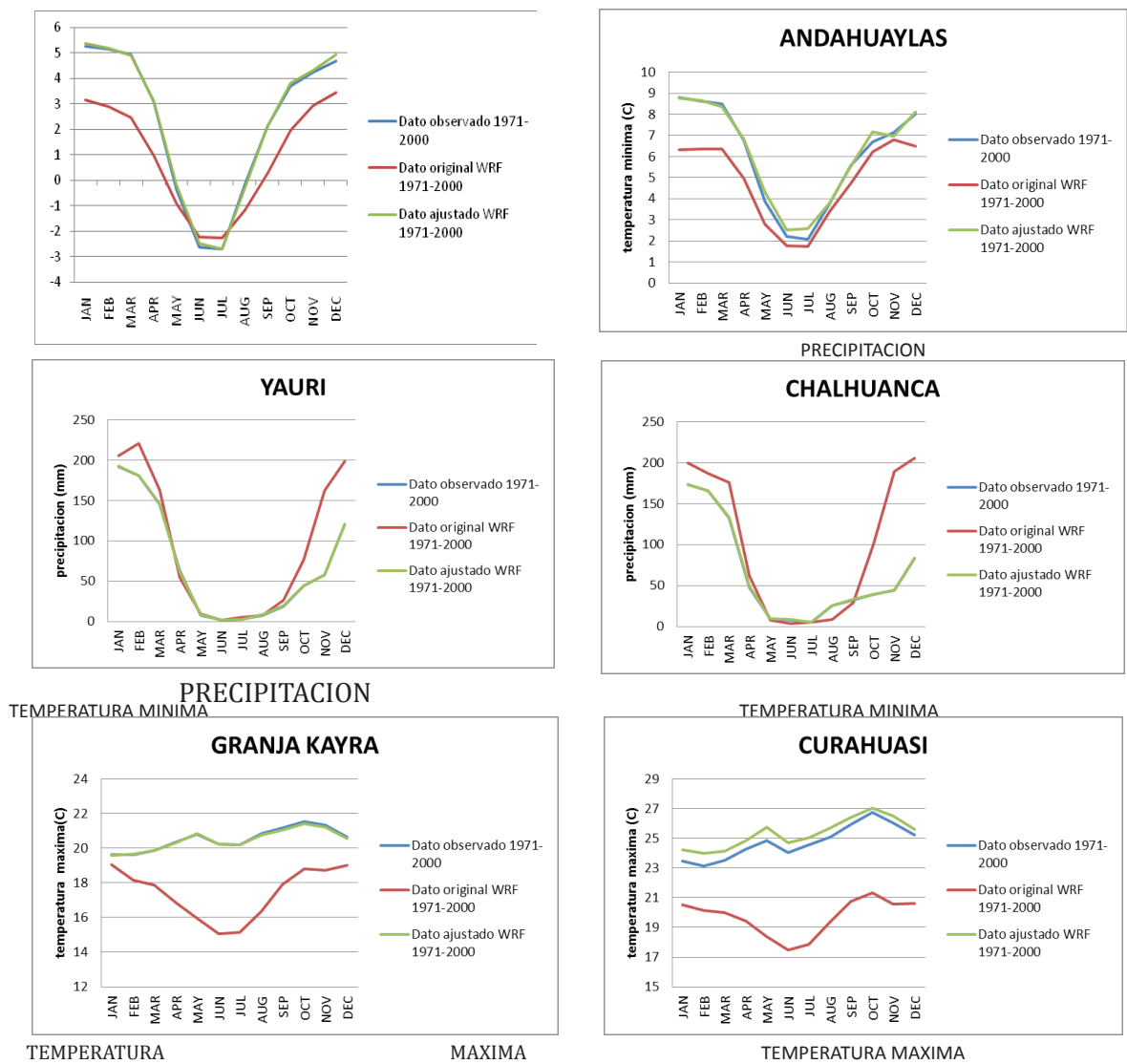


Figura 16: Variación del ciclo promedio anual de precipitación, temperaturas máxima y mínima del aire en localidades andinas de Cusco (Yauri, Granja Kcayra, Sicuani) y Apurímac (Chalhuanca, Curahuasi, Andahuaylas). Período 1971-2000. Línea azul observado en estación meteorológica, línea roja y verde simulación sin ajustar y ajustada del modelo WRF.

Los escenarios de temperaturas y precipitación simulados por WRF se complementan con las salidas de escala local de los modelos globales regionalizados estadísticamente HadCM3, ECHAM5 y CCSM, que tiene como función de transferencia las EOF.

En la figura 17 se muestra el campo espacial de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF) de la variable predictora TSM respecto a las variables predictandos: julio (a), enero (b) y febrero (c) para la estación meteorológica Sicuani. Se aprecia la distribución temporal de los pesos de la Primera Componente Principal de la TSM, que nos indica la frecuencia anual de los fenómenos caracterizados por la primera Componente Principal de la TSM que explican El Niño y su variabilidad climática interanual, con la máxima varianza de 42% en julio, 52% en enero y 55% en febrero; tal como se muestra en la figura 17.

De otro lado se identifica el número de patrones independientes que explican la máxima varianza que hicieron posible obtener el coeficiente de determinación ajustado del modelo de calibración, siendo mayor e igual a 0.4 para el caso de la precipitación y mayor a 0.5 para la temperatura máxima y mínima del aire. Este procedimiento se realizó de forma similar para cada una de las estaciones seleccionadas en Cusco y Apurímac.

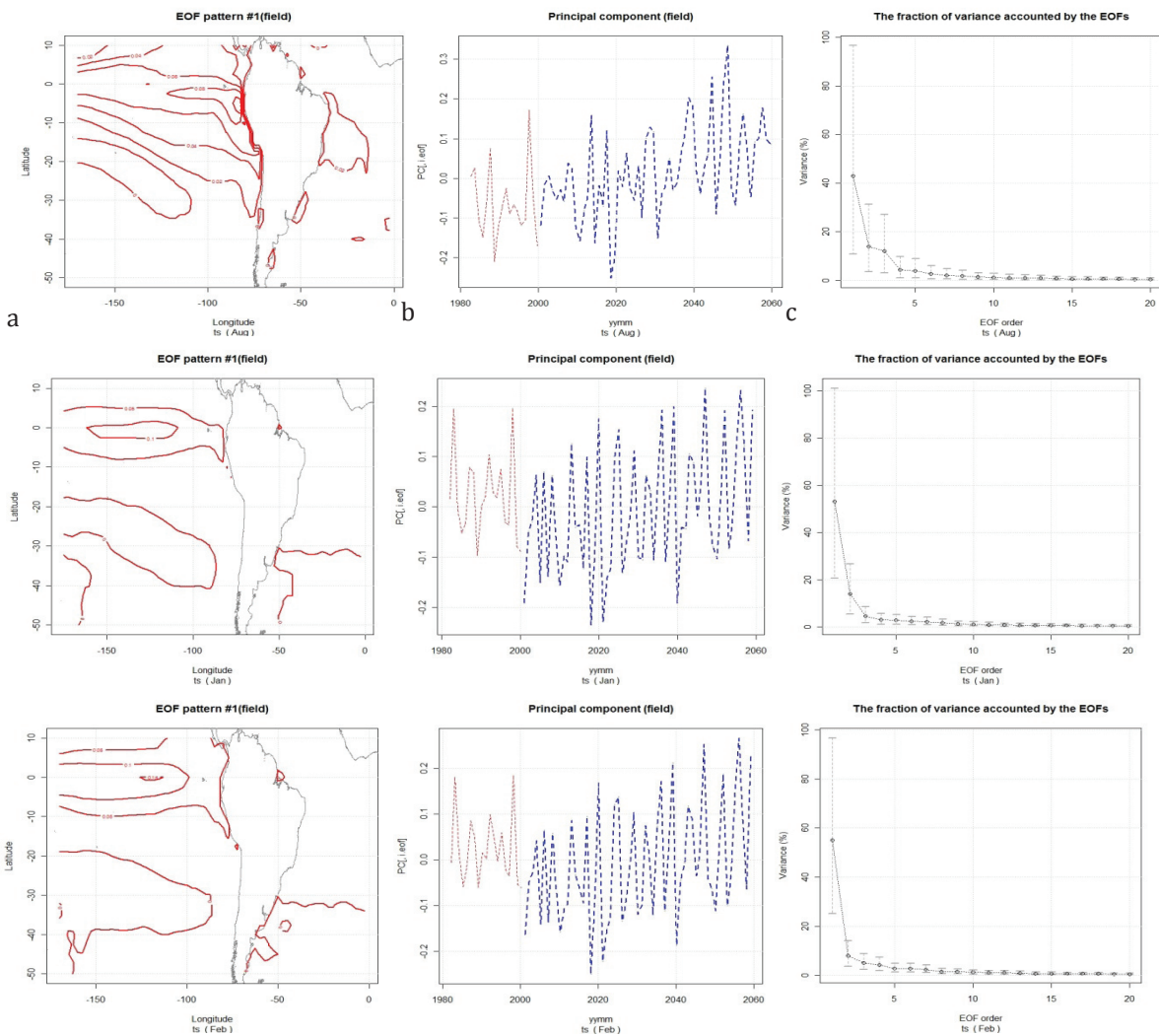


Figura 17: Campos de EOF (primera columna a), variación interanual de la Componente Principal (segunda columna b), y varianza explicada de la EOF de la TSM julio, enero y febrero (tercera columna c). Estación Sicuani (Cusco) latitud -14.3, longitud - 71.2, altitud 3574.

4.3 Proyecciones regionalizadas del clima medio en Cusco y Apurímac 2030

La discusión de resultados aquí presentados se restringe al valor promedio de los cambios proyectados en la precipitación y temperatura centrada en el año 2030, comprendido en el período 2016-2044, en la escala local, regional; en los períodos anual y estacional. Debido a que los cambios en el clima se dan en período suficientemente largos no menor a 30 años.

Los cambios en la temperatura y precipitación en Cusco y Apurímac presentados corresponden al resultado promedio de las proyecciones regionalizadas utilizando diferentes modelos globales HadCM3, ECHAM5, CCSM3; de las salidas del modelo regional WRF3.2 y del modelo global japonés TL959L60 MRI/JMA. Estos dos últimos presentan alta resolución espacial 20 km, siendo el escenario común a todos los modelos mencionados el A1B.

4.3.1 Cambios en la Precipitación a escala local

Los resultados a escala local indican en promedio, el aumento de la *precipitación anual* para el período 2030 respecto al clima actual; en la localidad de Cay Cay de 44 %, seguido de Curahuasi con 24 % y Abancay de 21 % (ver figura 18 y tabla 8). En el resto de las localidades analizadas (Chalhuanca, Pisac, Urubamba, Granja Kcayra, Ccatcca, Sicuani, Acomayo), se proyecta ligeros aumentos de la precipitación que corresponden a cantidades dentro del umbral superior de la variabilidad normal actual de precipitación siendo de 15% (valor experimental asociada a las observaciones en la zona andina).

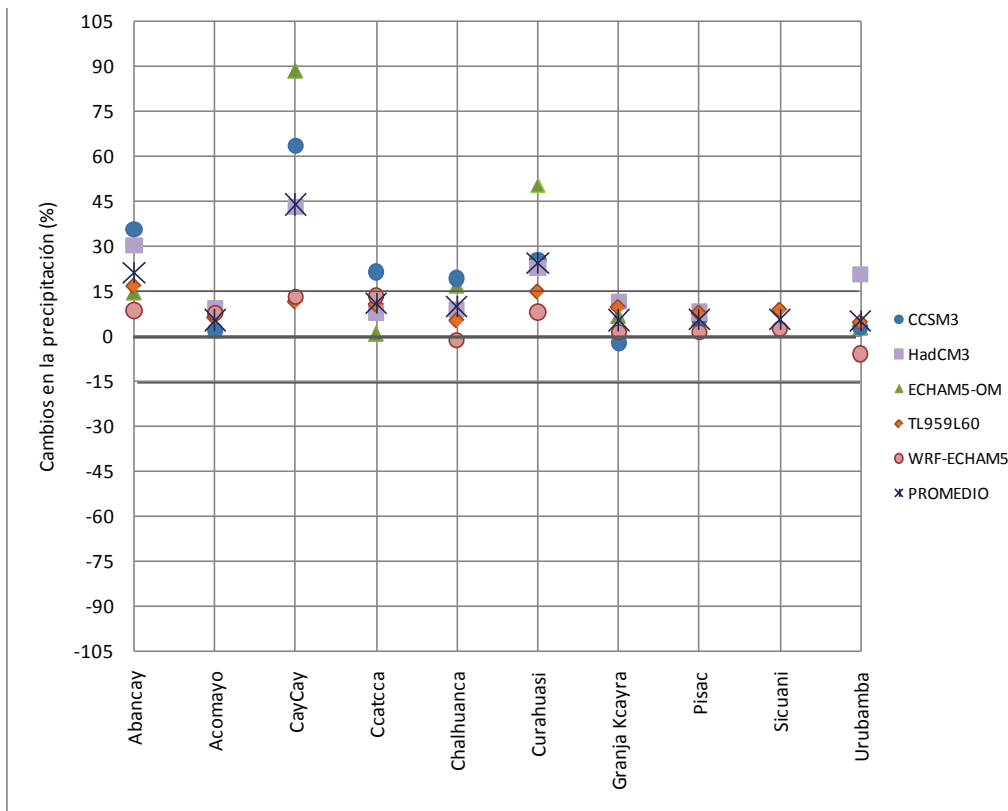


Figura 18: Cambios estimados en la precipitación anual (%) a escala local período centrado en 2030 relativo 1971-2000, proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA) y regionalizados utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM, WRF, MRI. Símbolo color azul (*) indica los cambios promedios resultantes en la precipitación.

En líneas generales, los resultados regionalizados indican en promedio incrementos de la precipitación anual en el futuro dentro de su variabilidad normal hasta de 15% en Acomayo, Ccatcca, Chalhuanca, Granja Kcayra, Pisac, Sicuani y Urubamba, indicado por el acuerdo de los diferentes modelos regionalizados dinámica y estadísticamente ver figura 18 y tabla 8.

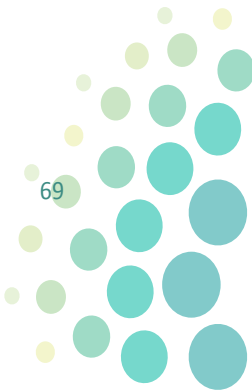
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5-OM	TL959L60	WRF-ECHAM5	PROMEDIO
Abancay	661.9	36	30	15	17	9	21
Acomayo	859.4	2	9	2	6	8	5
Cay Cay	317.0	63	43	89	11	13	44
Ccatcca	589.0	21	8	1	11	13	11
Chalhuanca	765.3	19	9	17	5	-1	10
Curahuasi	582.9	25	23	51	15	8	24
Granja Kcayra	667.1	-2	11	7	10	1	5
Pisac	564.4	6	8	6	8	1	6
Sicuani	597.6				9	2	6
Urubamba	478.9	3	21	3	5	-6	5

(*) Período 2030: promedio de enero a diciembre 2016-2044 donde n=2016

Tabla 8: Cambios en la precipitación ANUAL (%) período 2030* relativo 1971-2000

En verano (período de mayores precipitaciones, DEF), se proyectan en promedio ligeros aumentos de la precipitación respecto al clima actual, en Cay Cay (25%), Abancay (18%) y Curahuasi (16%). En el resto de las localidades analizadas, se proyecta el comportamiento de la precipitación dentro del umbral de la variabilidad normal (entre -15 y +15%), con ligera reducción de la precipitación en ~5 % en promedio en Ccatcca, Pisac y Urubamba (ver figura 19 y tabla 9).

Los cambios proyectados regionalizados con los diferentes modelos, son consistentes en el caso de la precipitación anual, debido a que los modelos indican concordancia en la dirección de cambios positivos o de aumento en Abancay, Cay Cay, Chalhuanca y Curahuasi, lo cual es mostrado en la figura 19.



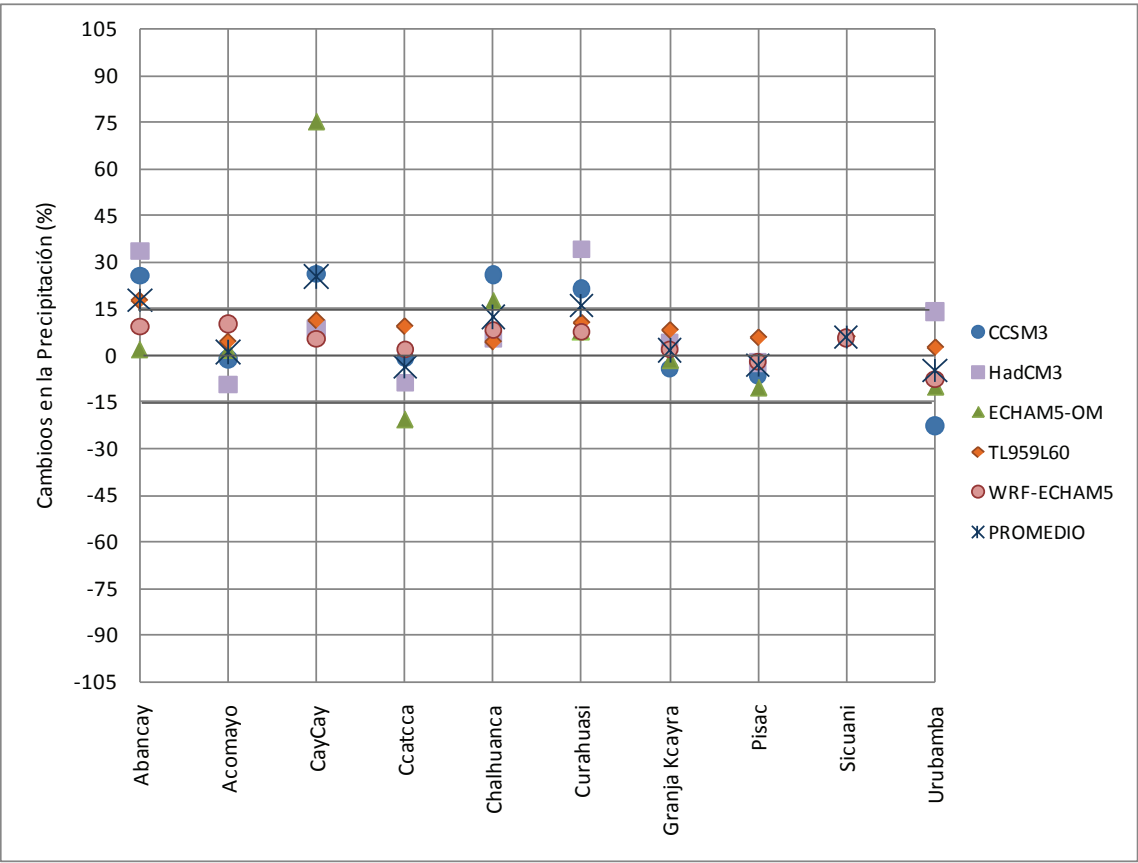
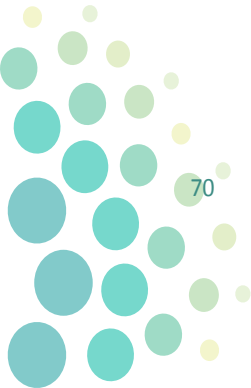


Figura 19: Cambios en la precipitación a escala local en VERANO (%) proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA) y regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM, WRF, MRI. Símbolo color azul (*) indica los cambios promedios resultantes en la precipitación.

En otoño (período de finalización de precipitaciones, MAM), la distribución promedio del cambio de precipitación para el período 2030, en gran parte de las localidades analizadas, proyectan cantidades positivas dentro del umbral de la variabilidad normal. Sin embargo, no hay un acuerdo consistente de las proyecciones regionalizadas con los diferentes modelos en la localidad de Pisac, ver figura 20 y tabla 9, ya que tres modelos indican aumento (HadCM3, WRF, TL959L60) y dos disminuciones (CCSM3, ECHAM5-OM) a pesar de estar forzados por el mismo escenario de emisión A1B. Por tanto la confiabilidad de las proyecciones en esta localidad es reducida a pesar que los valores proyectados caen dentro del umbral de la variabilidad normal siendo esta de $\pm 15\%$.

De otro lado en Abancay, Curahuasi y Cay Cay se proyectan aumentos importantes de la precipitación de 17, 30 y 49 % respecto al clima actual, en el trimestre MAM.



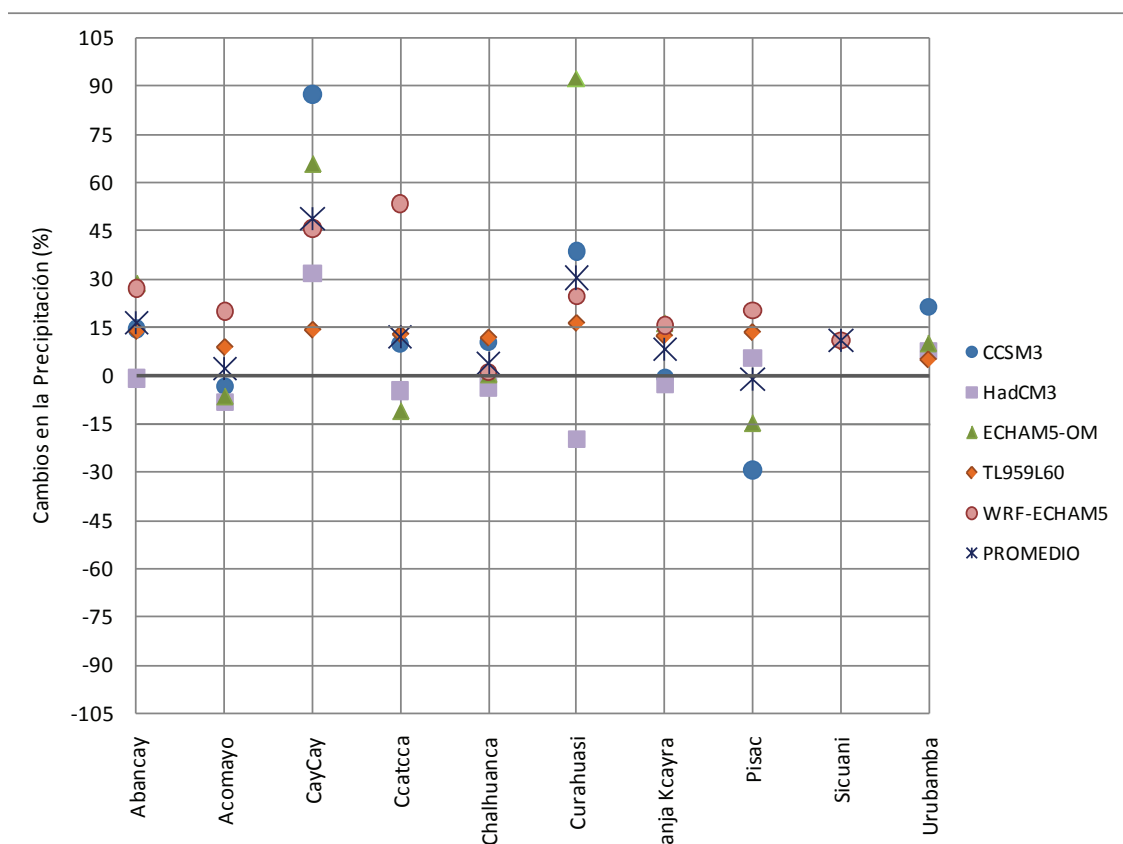


Figura 20: Cambios en la precipitación a escala local en OTOÑO (%) período 2030 relativo 1971-2000 (período de finalización de precipitaciones MAM), proyecciones regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3 y ECHAM5-OM.

En invierno (período de estiaje o seco, JJA) se proyecta, en promedio cambios en la precipitación, dentro del umbral de la variabilidad normal ($\pm 15\%$), en gran parte de las localidades andinas analizadas. A excepción de Sicuani que proyecta deficiencia de 22% y Ccatcca aumentos de 20%. Estos cambios proyectados fuera del umbral de la variabilidad normal actual, pueden ser poco significativos en invierno, ya que las precipitaciones en esta estación del año son escasas (ver figura 21 y tabla 10).

El grado de concordancia de los modelos regionalizados en invierno, es menor en relación al período anual y las estaciones de verano y otoño, observándose valores muy dispersos de los cambios en la precipitación provenientes de los modelos regionalizados, esencialmente en Abancay y Chalhuanca donde dos modelos (TL959L60, WRF) indican deficiencias del orden de 5 y 45% y tres modelos (HadCM3, ECHAM5, CCSM3) aumentos alrededor de 30%. En tanto en Sicuani los modelos TL959L60 y WRF muestran discrepancias. Es importante señalar que los resultados del modelo regional WRF en el período de estiaje JJA se torna pesimista, indicando en la totalidad de localidades analizadas un panorama de deficiencias de precipitaciones.

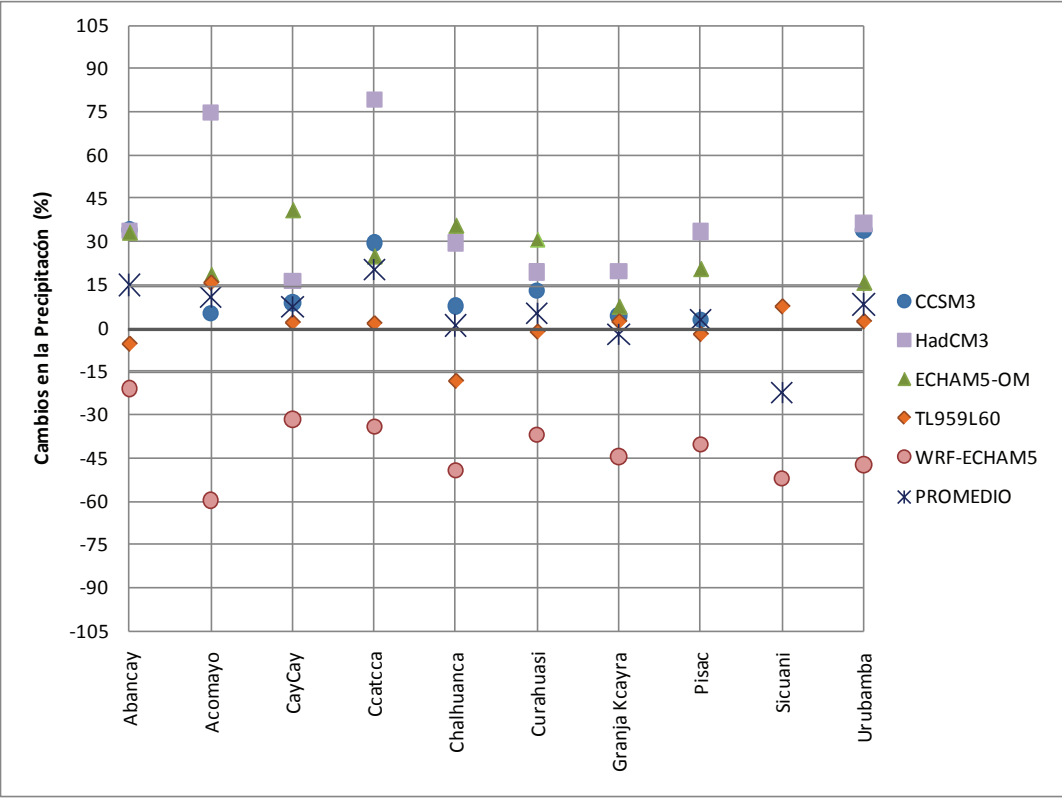
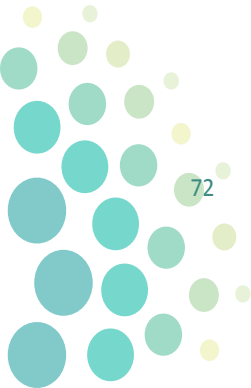


Figura 21: Cambios en la precipitación a escala local en INVIERNO (%) período 2030 respecto 1971-2000 (período seco JJA), proyecciones regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3 y ECHAM5-OM.

En primavera (período de inicio de precipitaciones, SON) en promedio, los escenarios regionalizados de precipitación indican por un lado cambios dentro del umbral de su variabilidad normal de $\pm 15\%$ en las localidades de Acomayo, Chalhuanca, Granja Kcayra, Sicuani, Urubamba, (ver figura 22 y tabla 10). Por otro lado, se proyectan aumentos importantes de la precipitación respecto al clima actual, en Cay Cay (42%), seguidos de Ccatcca (27%), Pisac (33%), Curahuasi (32%) y Abancay (30%). Este comportamiento de aumento de las precipitaciones en primavera, es la señal que modula la proyección anual, en las localidades de Cay Cay y Curahuasi principalmente.

El grado de acuerdo de los cambios proyectados de precipitación de los modelos regionalizados en primavera, es mayor en relación a la estación de invierno (período de estiaje). Asimismo, el modelo regional WRF se torna menos pesimista mostrando en general un panorama de ligeras deficiencias de precipitación pero dentro del umbral de la variabilidad normal actual (0 a -15%), en la totalidad de localidades analizadas.



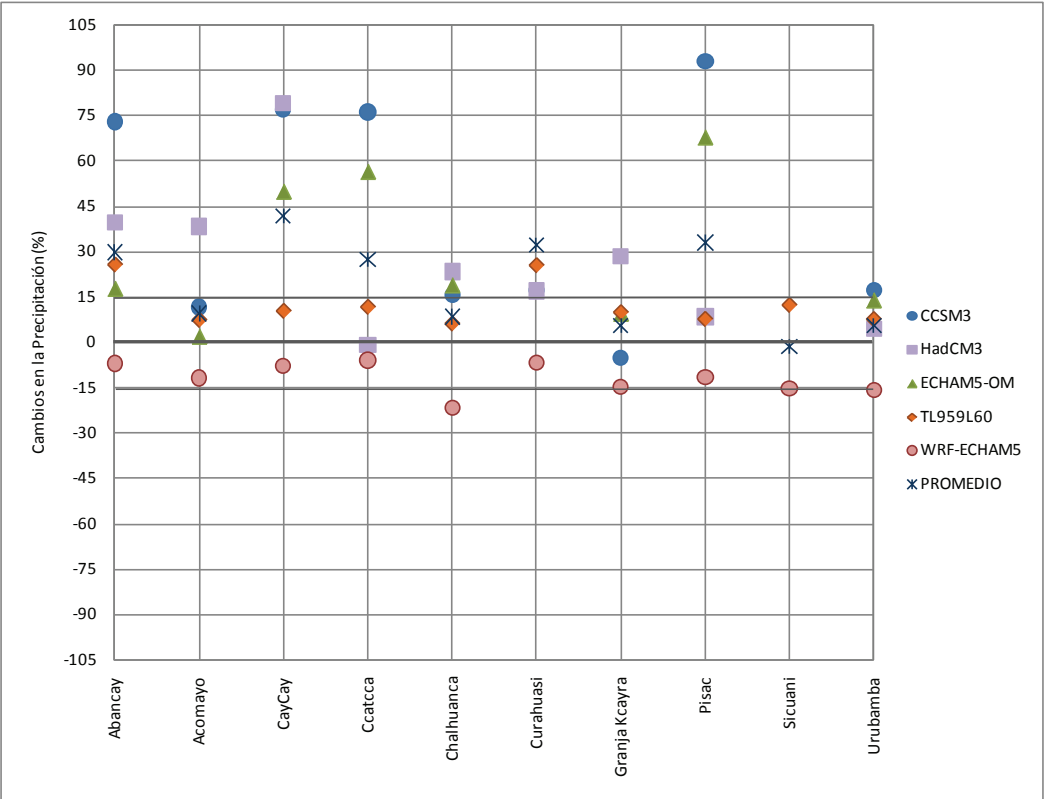
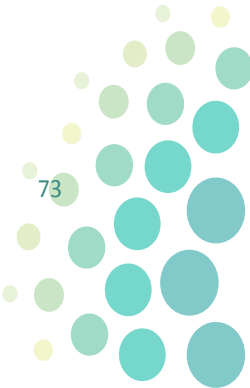


Figura 22: Cambios en la precipitación a escala local en PRIMAVERA (%) período 2030 relativo 1971-2000 (período de inicio de precipitaciones SON), proyecciones regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3 y ECHAM5-OM.

	VERANO (D ₁ , E, F ₁)							OTOÑO (M ₁ , A, M ₁)					
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF
	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Abancay	358.6	26	33	2	18	9	18	155.2	15	-1	28	14	27
Acomayo	465.1	-1	-9	2	4	10	1	212.2	-3	-8	-7	9	20
Cay Cay	180.3	26	9	75	11	5	25	79.5	87	32	66	14	46
Ccatcca	324.8	-1	-9	-20	9	2	-4	144.6	10	-5	-11	13	53
Chalhuanca	421.4	26	5	18	4	8	12	190	10	-4	0	12	1
Curahuasi	324.2	21	34	8	11	8	16	137	39	-20	92	16	25
G. Kcayra	371.2	-4	4	-1	8	2	2	145.1	-1	-3	16	12	16

(*) Período 2030: promedio 2016-2044, donde n=2016

Tabla 9: Cambios en la Precipitación en VERANO y OTOÑO (%) período 2030 respecto 1971-2000



	INVIERNO (JJA)							PRIMAVERA (SON)						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Abancay	24.6	34	34	33	-5	-21	15	120.0	73	40	18	26	-7	30
Acomayo	13.5	5	75	18	16	-60	11	169.2	12	38	2	7	-12	10
Cay Cay	7.4	9	16	41	2	-32	7	50.0	77	79	50	10	-8	42
Ccatcca	16.7	29	79	25	2	-34	20	105.0	76	-1	56	12	-6	27
Chalhuanca	38.3	8	30	35	-18	-50	1	114.8	16	23	19	6	-21	9
Curahuasi	12.9	13	19	31	-1	-37	5	109.0	17	17	108	25	-7	32
G. Kcayra	12.4	4	20	7	2	-45	-2	141.5	-5	29	10	10	-15	6
Pisac	16.1	3	33	20	-2	-40	3	95.9	93	9	68	8	-11	33
Sicuani	13.64				7	-52	-22	115.5				12	-15	-1
Urubamba	14.2	34	36	16	2	-47	8	84.5	17	4	14	8	-16	6

Tabla 10: Cambios en la precipitación INVIERNO y PRIMAVERA (%) período 2030 respecto 1971-2000

4.3.2 Cambios en la precipitación a escala regional (espacial)

En Cusco y Apurímac, la precipitación en el período anual se proyecta para el 2030, mayormente dentro del umbral superior de variabilidad normal actual, es decir con ligeros aumentos y deficiencias en el rango de $\pm 15\%$, y con dos núcleos importantes el primero en la provincia de Abancay, en Apurímac y el segundo localizado en el extremo noroeste de la provincia de Quispicanchis, en Cusco; que alcanzan valores entre 15 y 25% sobre el valor normal actual, ver figura 23 y mapa 6 (anexo 8.1).

En el verano (período de mayores precipitaciones DEF) en líneas generales, las precipitaciones se mantendrían similares al comportamiento promedio anual (ver figura 23, mapas 6 y 7), es decir dentro de la variabilidad normal actual, y con la presencia de dos núcleos de precipitación importantes que alcanzan hasta 44% sobre el valor normal actual en el extremo noroeste de la provincia de Quispicanchis y la provincia de Abancay.

En el otoño (período de finalización de precipitación MAM) se observan incrementos significativos de 30% relativo al clima actual en Abancay, Andahuaylas y Chincheros en Apurímac; y la frontera de las provincias de Paucartambo, Calca, Cusco, Paruro, Quispicanchis en Cusco llegando hasta 45% y núcleos muy localizados al suroeste de la provincia La Convención, la provincia de Cusco, al noreste y sur este de las provincias Canchis y Quispicanchis con valores de aumentos que llegan hasta 30%. Esta característica indicaría que el período de *mayores lluvias* DEF se prolongaría en el 2030 abarcando la estación de otoño (MAM). En el resto de las regiones de estudio, las precipitaciones se presentarían dentro de la variabilidad normal actual de $\pm 15\%$.

En invierno (período de estiaje JJA), se proyecta deficiencias muy importantes en las provincias de Chincheros, Cotabambas, Grau y extremo sur de Abancay, en las cuales el déficit alcanza hasta 30% y llegan hasta 42% en Antabamba y Andahuaylas, en Apurímac. Similar comportamiento se observa en las provincias de Chumbivilcas, Espinar, Canas, Canchis con déficit entre 15 y 30% y llegando hasta 42% en Anta y Calca, en Cusco. Sin embargo, en el clima actual en este trimestre JJA las precipitaciones son las más bajas del año. Esta característica de déficit pluviométrico indicaría situaciones asociadas a mayor frecuencia de cielos despejados, incremento de temperatura, alta evaporación, sequedad del suelo con efectos relevantes en las condiciones hídricas principalmente al extremo sur de las regiones. Asimismo, aunado al crecimiento

poblacional, pobreza y a las actividades humanas de sobrepastoreo, mal uso de los recursos agua y suelo, le confieren la característica de doblemente vulnerable frente al cambio climático.

En primavera (período de inicio de precipitaciones SON) las variaciones en la precipitación son en general similares a lo proyectado en el comportamiento promedio anual y en la estación de verano, con la aparición de un núcleo deficitario de precipitaciones de 18% ubicado al suroeste de la provincia La Convención (ver figura 23).



Figura 23: Cambio promedio en la precipitación a escala regional (%) período 2030 relativo 1971-2000, proyección promediada de los modelos dinámicos (TL96969L60 y WRF-ECHAM5-OM) y regionalizados estadísticamente (CCSM3, ECHAM5-OM, HadCM3).

En la tabla 11 se presenta los valores de cambios en la precipitación (%) según la división de las regiones de estudio (figura 23 a) basada en zonas climatológicamente homogéneas: Región Cusco: Selva Norte (1), Sierra Nor Occidental (2), Sierra Nor Oriental (3), Sierra Central Occidental (4), Sierra Central Oriental (5), Selva Central (6), Sierra Sur (7) y Región Apurímac: Sierra Norte (8), Sierra Central (9), Sierra Sur (10).

REGION	DIVISION	ZONA		Δ CAMBIOS EN LA PRECIPITACION				
				(%)				
CUSCO	Selva	Norte (1)		ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON
				-9 a 15	-15 a 15	0 a 15	-15 a 15	-15 a 15
	Centro (6)		-9 a 15	-15 a 15	0 a 15	-15 a 15	-15 a 15	
	Sierra	Norte	Occidental (2)	0 a 15	0 a 15	0 a 15	-15 a 15	-15 a 15
			Oriental (3)	-9 a 15	-15 a 15	-15 a 15	-15 a -30	-15 a 0
		Centro	Occidental (4)	-9 a 44	-15 a 25	0 a 49	-42 a 23	-15 a 30
			Oriental (5)	-9 a 44	-15 a 25	0 a 45	-42 a 23	-15 a 44
Sur (7)		-9 a 15	-15 a 15	-15 a 15	-15 a -30	-15 a 15		
APURIMAC	Sierra	Norte (8)		0 a 30	0 a 25	0 a 30	-42 a 15	-15 a 44
		Centro (9)		0 a 15	0 a 15	0 a 15	-15 a -42	-15 a 15
		Sur (10)		-9 a 15	-15 a 15	-15 a 15	-42 a 0	-15 a 15

Tabla 11: Cambio promedio en la precipitación a escala regional (%) período 2030 relativo 1971-2000,

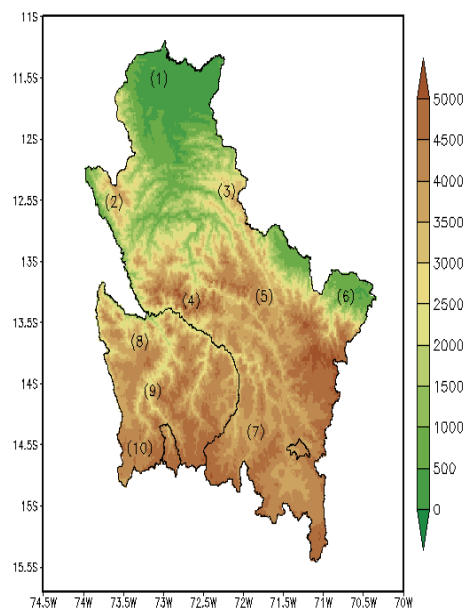


Figura 23 a: División de las regiones de estudio.

4.3.3 Cambios en la temperatura máxima y mínima del aire a escala local

Se proyecta para el *período anual*, incrementos de la temperatura máxima y mínima del aire promedio anual entre 0.7 y 1°C respecto al clima actual en el total de estaciones analizadas (ver figura 24), siendo la variabilidad normal actual de cambios en la temperatura de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (valor experimental asociada a las observaciones).

Las localidades donde se proyecta incrementos de temperaturas en la máxima y la mínima del aire en 0.7°C respecto a la normal actual, son Abancay y Chalhuanca (ver tablas 12 y 13). Asimismo, el aumento sustancial en $\sim 1^{\circ}\text{C}$ en la temperatura máxima y mínima del aire se proyecta en las localidades de Curahuasi y Acomayo, siendo su valor normal actual anual de 24.8°C y 5.2°C respectivamente.

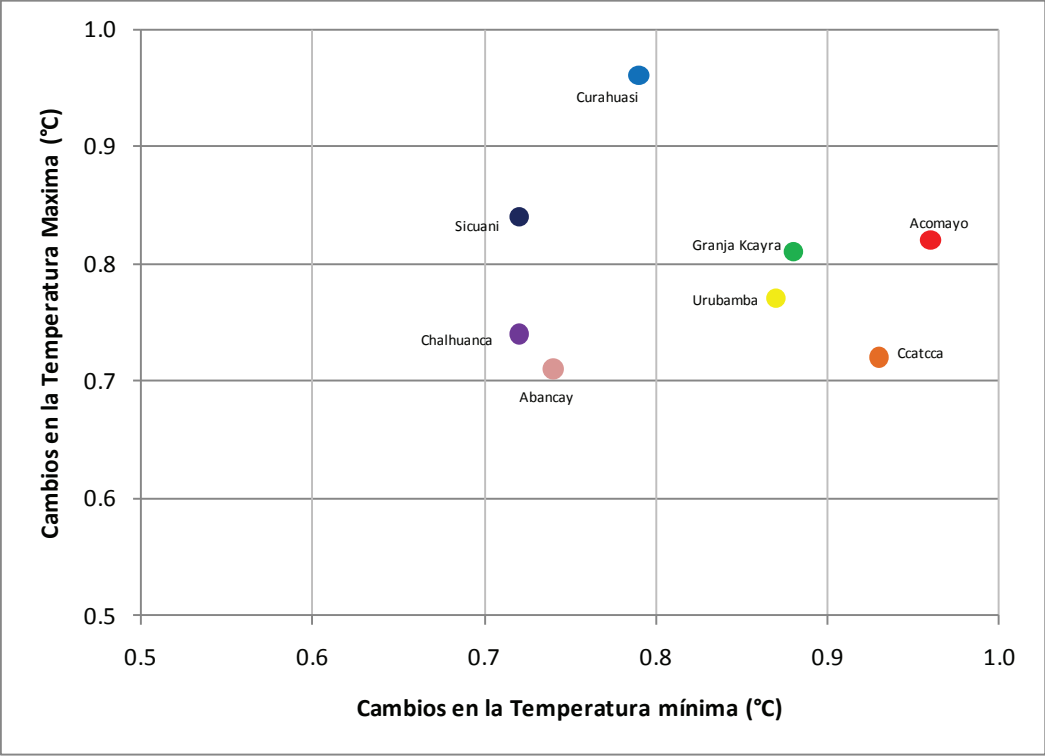
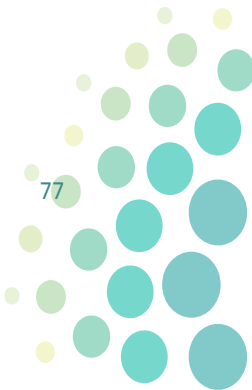


Figura 24: Cambio promedio de la temperatura máxima y mínima del aire ANUAL (°C) período 2030

En la figura 25 a y b se puede observar el sesgo de los modelos dinámicos TL959L60 y WRF proyectando cambios positivos alrededor de 1°C en la temperatura máxima y mínima del aire en el total de estaciones analizadas en la región Apurímac (Abancay, Chalhuanca, Curahuasi) y Cusco (Acomayo, Ccatcca, Granja Kcayra, Sicuani, Urubamba), valores que en gran medida contribuyen con mayor peso cuando se realiza el promedio (símbolo color azul) frente a los modelos regionalizados estadísticamente (HadCM3, CCSM3, ECHAM5-OM) que muestran en general, aumento con valores más conservadores, es decir se desvían moderadamente del umbral superior de variabilidad normal actual de *cambios en la temperatura máxima y mínima del aire* siendo de 0 a 0.4°C .



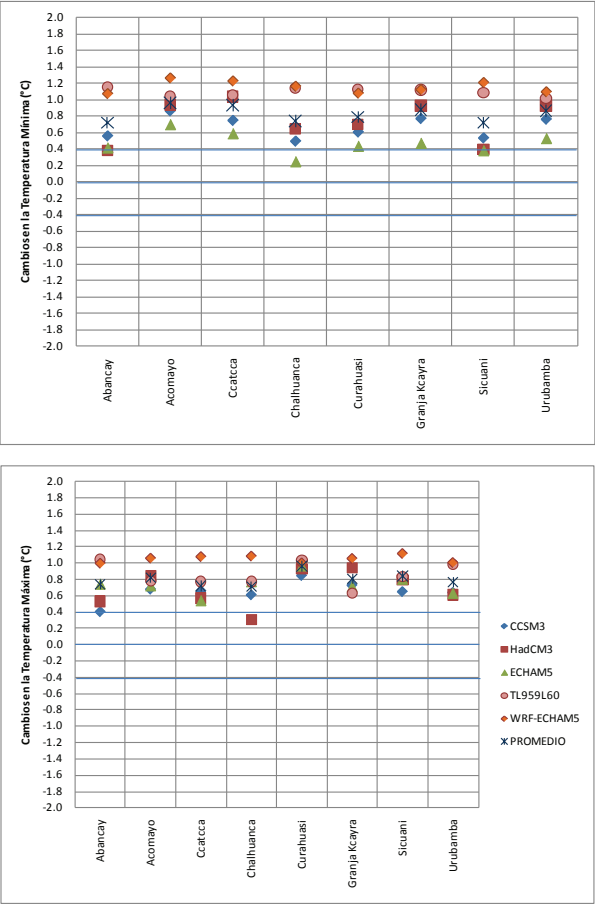


Figura 25 a y b: Cambios estimados en la temperatura mínima y máxima del aire ANUAL (°C) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado de las proyecciones del modelo TL959L60 y regionalizadas CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5. El símbolo de color azul indica el cambio promedio.

	ANUALn _n						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Abancay	11.2	0.6	0.4	0.4	1.2	1.1	0.7
Acomayo	5.2	0.9	0.9	0.7	1.1	1.3	1.0
Ccatcca	1.2	0.8	1.0	0.6	1.1	1.2	0.9
Chalhuanca	6.9	0.5	0.7	0.2	1.1	1.2	0.7
Curahuasi	10.5	0.6	0.7	0.4	1.1	1.1	0.8
G. Kcayra	3.7	0.8	0.9	0.5	1.1	1.1	0.9
Sicuani	2.3	0.5	0.4	0.4	1.1	1.2	0.7
Urubamba	6.4	0.8	0.9	0.5	1.0	1.1	0.9

(*) Período 2030: promedio 2016-2044, donde n=2016

Tabla 12: Cambios en la temperatura mínima del aire promedio ANUAL (°C) período 2030 relativo 1971-2000

	ANUALn						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Abancay	23.6	0.4	0.5	0.7	1.0	1.0	0.7
Acomayo	21.0	0.7	0.8	0.7	0.8	1.1	0.8
Ccatcca	15.3	0.7	0.6	0.5	0.8	1.1	0.7
Chalhuanca	23.3	0.6	0.3	0.8	0.8	1.1	0.7
Curahuasi	24.7	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
G. Kcayra	20.5	0.7	0.9	0.7	0.6	1.1	0.8
Sicuani	20.2	0.7	0.8	0.8	0.8	1.1	0.8
Urubamba	22.5	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	0.8

Tabla 13: Cambios en la temperatura máxima del aire promedio ANUAL (°C) período 2030 relativo 1971-2000

En verano (período de precipitaciones, DEF) se proyecta en promedio aumentos de la temperatura máxima del aire en el total de localidades analizadas entre 0.5 y 0.9°C, y la temperatura mínima entre 0.7 y 1°C (ver figura 26, tablas 14 y 16). El incremento sustancial de 0.9°C en la temperatura máxima se proyecta en las localidades de Granja Kcayra y Curahuasi, moderado aumento de 0.5°C en la localidad de Chalhuanca.

Con respecto al aumento sustancial de la temperatura mínima en 1°C se proyecta en la localidad Urubamba, que podría estar físicamente asociada con aumentos de cobertura nubosa y precipitación en época de lluvias. En tanto, el moderado aumento de 0.7°C en la temperatura mínima se muestra en Curahuasi y Abancay, ver tabla 14 y figuras 20 y 21 a.

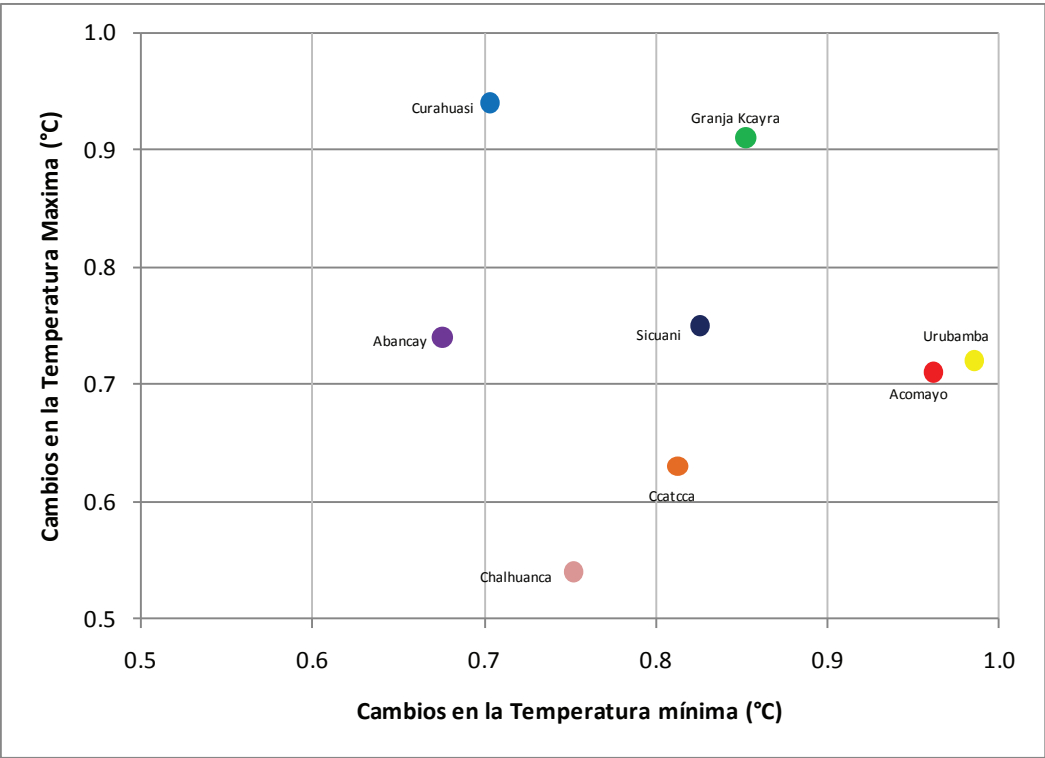
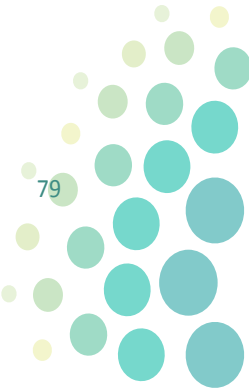


Figura 26: Cambio promedio de la temperatura máxima y mínima del aire VERANO (°C) período 2030



En las figuras 27 a y b, se observa los resultados de los modelos regionalizados principalmente CCSM3, HadCM3, WRF y modelo TL959L60 que indican el aumento de la temperatura mínima y máxima del aire de forma consistente, aunque algunos modelos con valores más conservadores que otros. El promedio de todos los valores proyectados (símbolo color azul), reflejan cambios con aumentos por encima del umbral superior de su variabilidad normal actual.

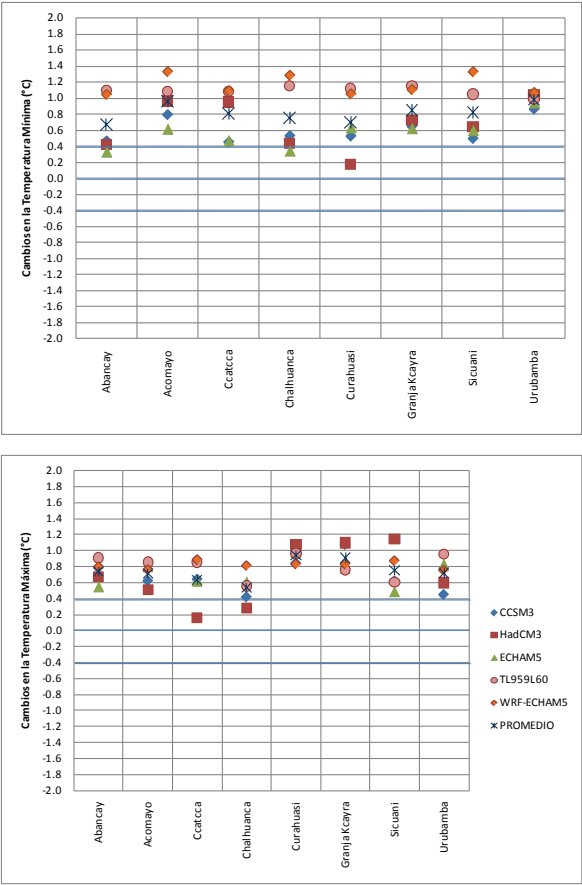
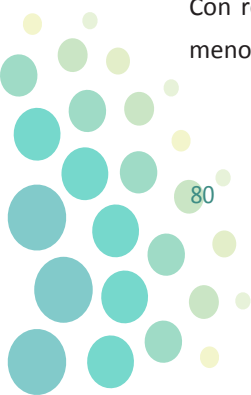


Figura 27 a y b: Promedio de Cambios en la temperatura mínima y máxima del aire VERANO (°C) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado de las proyecciones del modelo TL959L60, proyecciones regionalizadas CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5. El símbolo de color azul indica el cambio promedio.

En la estación de *otoño* (período de finalización de lluvias, MAM) se proyecta en promedio aumentos de la temperatura máxima entre 0.7 y 1°C, y la temperatura mínima entre 0.6 y 1°C en el total de localidades analizadas (ver figura 28 y tablas 14 y 16).

La localidad de Abancay muestra aumento de la temperatura máxima en 0.7°C, superior a su variabilidad normal actual de cambios siendo esta de ± 0.4°C. En tanto la localidad de Curahuasi muestra aumento sustancial de la temperatura en 1°C.

Con respecto a la temperatura mínima los mayores incrementos de 1°C se muestran en Urubamba y los menores de 0.6 °C en Sicuani.



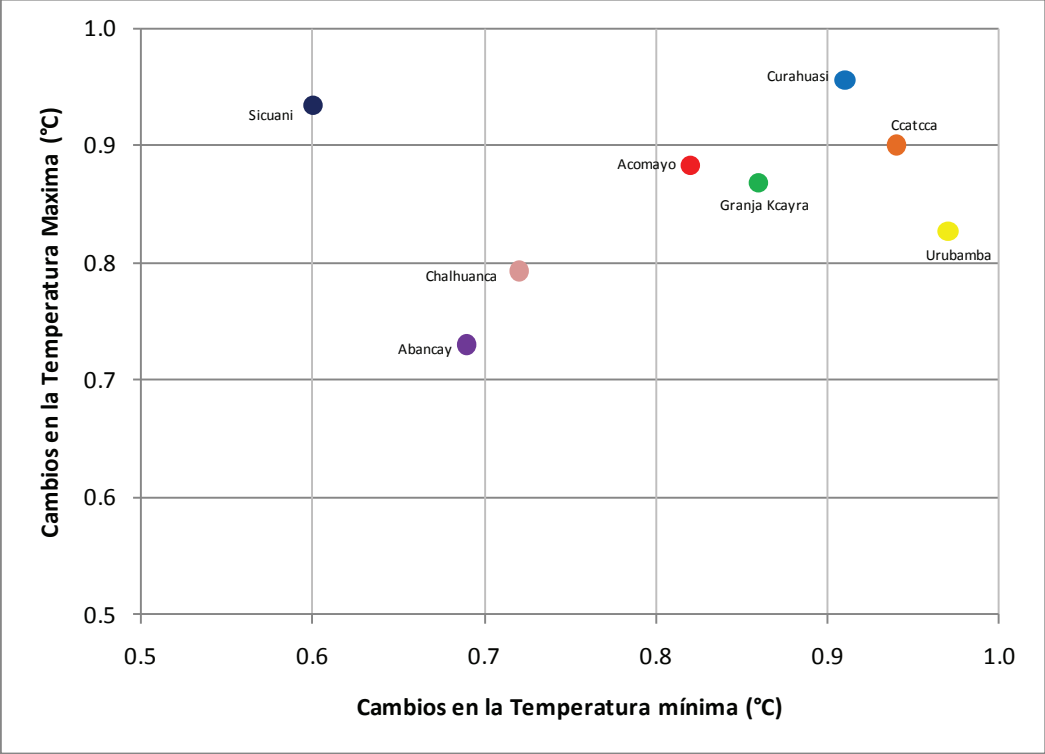


Figura 28: Cambio promedio de la temperatura máxima y mínima del aire OTOÑO (°C) período 2030

De otro lado a diferencia de otras estaciones del año y de la temperatura máxima, se observa en la figura 29 a y b la reducción del grado de concordancia de los modelos regionalizados en la magnitud de aumento de la temperatura mínima en otoño (período de finalización de lluvias) que se ve reflejado en la dispersión de los cambios esencialmente en Chalhuanca y Sicuani, debido a la baja performance de la proyección de los modelos globales regionalizados en sus simulaciones en esta época del año para esta variable.

Asimismo, se observa que cada modelo regionalizado simula en la misma dirección de aumento los cambios de temperaturas y proporciona distinta magnitud en sus respuestas, aunque estén forzados por un mismo escenario de emisión (A1B), debido a que los modelos globales regionalizados presentan distintas parametrizaciones, niveles verticales, resolución espacial, entre otros.

El grado de acuerdo o convergencia de los modelos indica niveles de confianza altos y reducirá la incertidumbre en la proyección del cambio, mientras el desacuerdo o divergencia de las respuestas se verá reflejado en una mayor incertidumbre que está asociado a una menor confiabilidad.

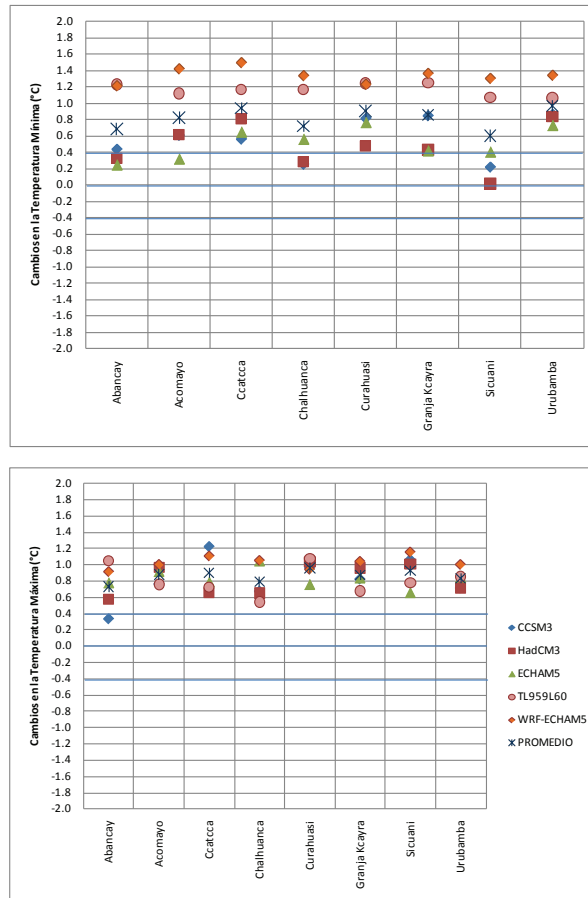


Figura 29 a y b: Promedio de Cambios estimados en la temperatura mínima y máxima del aire OTOÑO (%) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado de las proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA) y regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5.

En invierno (período seco, JJA) se proyecta los mayores aumentos de la temperatura máxima entre 0.8 y 0.9°C y la temperatura mínima entre 0.6 y 0.9°C (ver figura 30, tablas 15 y 17).

Todas las localidades analizadas superan en casi el doble el valor del umbral superior de la variabilidad actual de cambios en la temperatura máxima siendo esta de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento es observado en Ccatcca, Urubamba, Sicuani, en Cusco y Curahuasi en Apurímac, principalmente. En tanto, Granja Kcayra en Cusco y Chalhuanca en Apurímac, presentan los menores incrementos de aproximadamente 0.8°C respecto al clima actual.

En relación, a la distribución de los valores de cambios, a diferencia de la estación de otoño, invierno muestra menor dispersión, en las distintas localidades de Cusco y Apurímac, indicando mayor nivel de confianza en las proyecciones dadas.

De otro lado, las localidades de Acomayo, Granja Kcayra y Ccatcca son las que muestran mayores incrementos (0.9°C) en la temperatura mínima. En tanto, en Abancay se proyecta en el futuro 2030, moderado incremento en promedio de 0.6°C en la temperatura mínima.

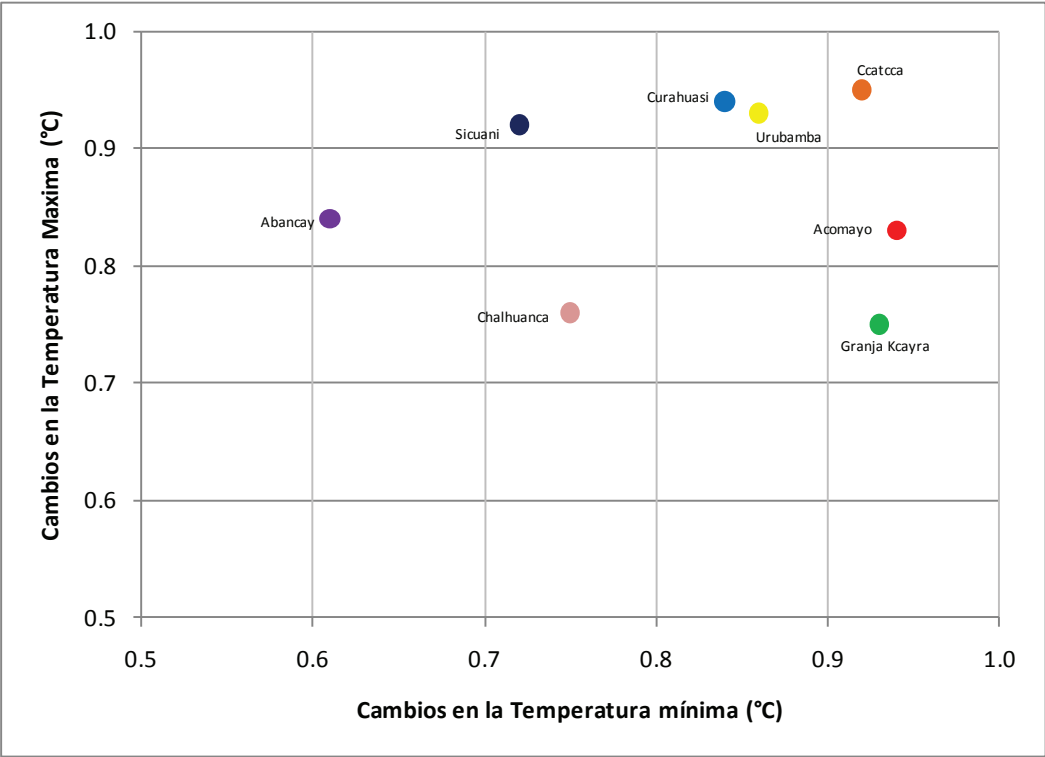


Figura 30: Promedio de Cambios estimados en la temperatura máxima y mínima del aire INVIERNO (%) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado de las proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA), proyecciones regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5.

En la figura 31 a y b se observa en invierno (período de estiaje) al igual que la estación de otoño, un mayor concordancia en la magnitud de las proyecciones de los cambios en la temperatura máxima provenientes de los modelos regionalizados de tipo estadístico, en tanto los dinámicos TL959L60 y WRF discrepan en la magnitud de aumento hasta en 0.4°C en relación a los de tipo estadístico, esencialmente en Acomayo y Granja Kcayra.

Con respecto a los cambios en la temperatura mínima el acuerdo de los modelos se ve reducida y se refleja en la dispersión de los valores especialmente en Abancay y Sicuani, donde por un lado los modelos regionalizados estadísticamente proyectan en promedio, aumentos de la temperatura mínima de 0.7°C y por otro lado los modelos dinámicos (TL959L60 y WRF) aumentos sustanciales hasta 1.3°C, por lo que la confianza de la proyección en la magnitud de los cambios para estas localidades y en esta estación del año es mejor representada por el promedio (símbolo color azul). En el resto de localidades (Acomayo, Ccatcca, Curahuasi, Granja Kcayra, Urubamba) la confianza es mayor debido al mayor acuerdo de los modelos en la proyección de la magnitud de los cambios.

Así mismo, en la estación de invierno existe una mayor confianza en la magnitud de la proyección de los cambios en la temperatura mínima, en relación a la temperatura máxima.

En líneas generales, el resultado del promedio de los cambios proyectados por todos los modelos evaluados muestra un consistente aumento (símbolo color azul) de las temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de la variabilidad normal actual de cambios siendo esta de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$.

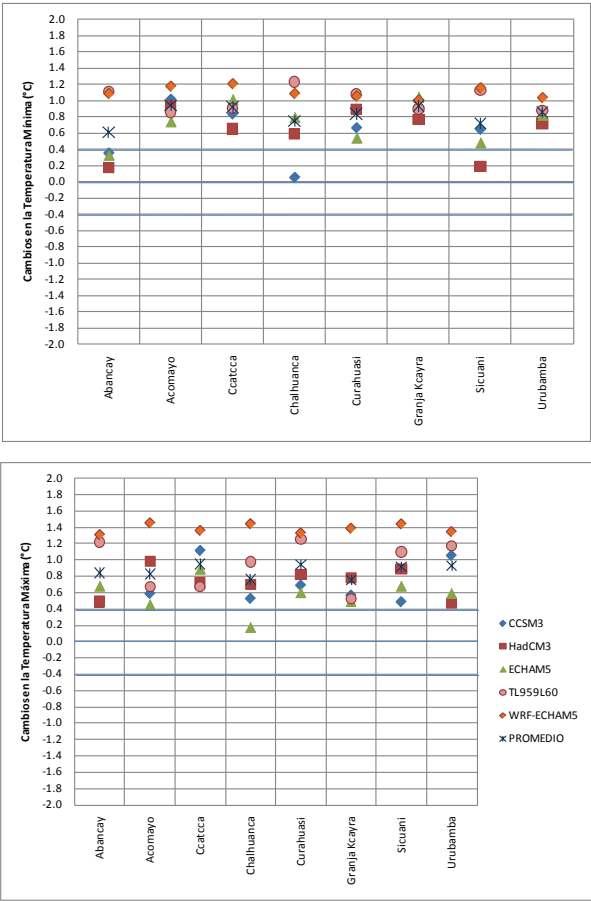


Figura 31 a y b: Promedio de Cambios estimados en la temperatura mínima y máxima del aire INVIERNO (%) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado de las proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA), y regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5.

En primavera (período de inicio de precipitaciones, SON) se proyecta en promedio aumentos en la temperatura máxima entre 0.7 y 0.9°C y en la temperatura mínima entre 0.7 y 1°C para el período 2030, en relación al clima actual. Los mayores cambios de la temperatura mínima se observan en Acomayo, Ccatcca y Granja Kcayra y el menor valor de cambio en Abancay (ver figura 32 y tabla 15). Estos cambios podrían estar físicamente relacionados con la mayor frecuencia de cobertura nubosa o una tropósfera más húmeda y no necesariamente a la ocurrencia precipitaciones en esta época del año. Para el caso de la temperatura máxima del aire los mayores cambios se alcanzarían en Curahuasi y Urubamba y los menores cambios en Abancay, Ccatcca, Chalhuanca y Granja Kcayra (ver figura 32, tablas 15 y 17).

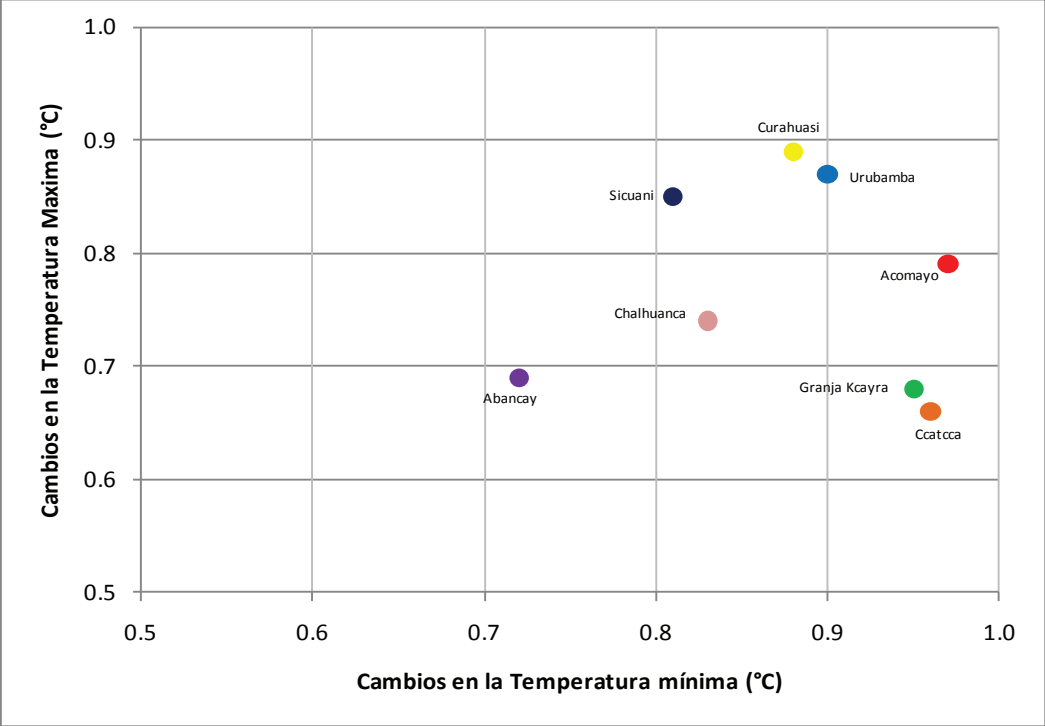
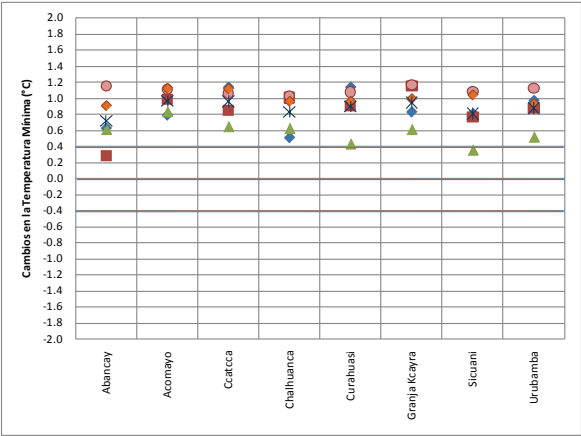


Figura 32: Promedio de Cambios estimados en la temperatura máxima y mínima del aire PRIMAVERA (%) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado del promedio de las proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA) y regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5.

Las figuras 33 a y b muestran la magnitud de los cambios proyectados para las variables temperaturas máxima y mínima del aire, se observa la consistencia del aumento en ambas variables, el total de los modelos indican acuerdo en las proyecciones con la menor dispersión de la magnitud de los valores de cambios en las variables evaluadas, en Acomayo, Ccatcca, Chalhuanca, Granja Kcayra para la temperatura mínima y en Acomayo, Curahuasi, Urubamba para la temperatura máxima.



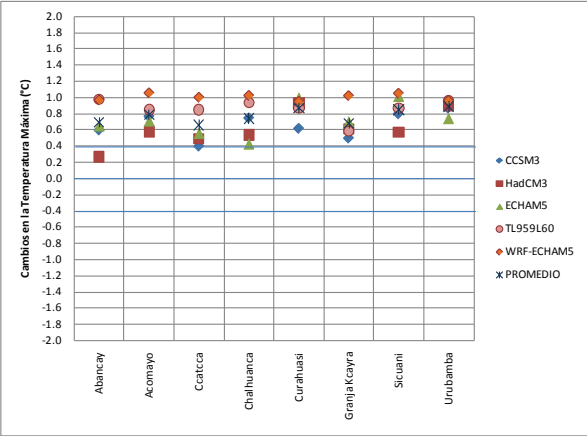


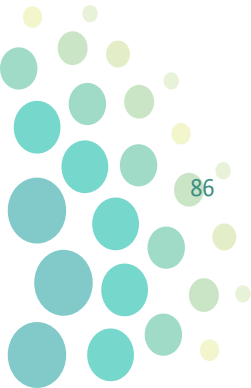
Figura 33 a y b: Promedio de Cambios estimados en la temperatura mínima y máxima del aire PRIMAVERA (%) centrado en el 2030 relativo 1971-2000, resultado de las proyecciones del modelo TL959L60 (MRI/JMA), y regionalizadas utilizando diferentes modelos globales CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM y WRF-ECHAM5.

	VERANO (D _{n-1} E F _n)							OTOÑO (M _n A _n M _n)						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Abancay	12.2	0.5	0.4	0.3	1.1	1.1	0.7	11.6	0.4	0.3	0.3	1.2	1.2	0.7
Acomayo	7.6	0.8	1.0	0.6	1.1	1.3	1.0	5.2	0.6	0.6	0.3	1.1	1.4	0.8
Catcca	3.6	0.5	1.0	0.5	1.1	1.1	0.8	1.4	0.6	0.8	0.7	1.2	1.5	0.9
Chalhuanca	9.0	0.5	0.4	0.4	1.2	1.3	0.8	6.9	0.3	0.3	0.6	1.2	1.3	0.7
Curahuasi	11.8	0.5	0.2	0.6	1.1	1.1	0.7	11.0	0.8	0.5	0.8	1.3	1.2	0.9
G. Kcayra	7.0	0.7	0.7	0.6	1.2	1.1	0.9	3.8	0.9	0.4	0.4	1.3	1.4	0.9
Sicuani	5.1	0.5	0.7	0.6	1.1	1.3	0.8	2.6	0.2	0.0	0.4	1.1	1.3	0.6
Urubamba	9.3	0.9	1.1	0.9	1.0	1.1	1.0	6.9	0.9	0.8	0.7	1.1	1.3	1.0

Tabla 14: Cambios en la temperatura mínima del aire VERANO y OTOÑO (°C) período 2030 relativo 1971-2000

	INVIERNO (J _n J _n A _n)							PRIMAVERA (S _n O _n N _n)						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Abancay	9.5	0.4	0.2	0.3	1.1	1.1	0.6	11.7	0.6	0.3	0.6	1.2	0.9	0.7
Acomayo	1.5	1.0	0.9	0.7	0.9	1.2	0.9	6.4	0.8	1.0	0.8	1.1	1.1	1.0
Catcca	-2.4	0.8	0.7	1.0	0.9	1.2	0.9	2.1	1.1	0.9	0.6	1.1	1.1	1.0
Chalhuanca	4.1	0.1	0.6	0.8	1.2	1.1	0.8	7.6	0.5	1.0	0.6	1.0	1.0	0.8
Curahuasi	8.1	0.7	0.9	0.5	1.1	1.1	0.8	11.1	1.1	0.9	0.4	1.1	1.0	0.9
G. Kcayra	-0.9	0.9	0.8	1.0	0.9	1.0	0.9	4.8	0.8	1.2	0.6	1.2	1.0	1.0
Sicuani	-1.5	0.6	0.2	0.5	1.1	1.2	0.7	3.4	0.8	0.8	0.4	1.1	1.0	0.8
Urubamba	2.2	0.9	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	7.1	1.0	0.9	0.5	1.1	0.9	0.9

Tabla 15: Cambios en la temperatura mínima INVIERNO Y PRIMAVERA (°C) período 2030 relativo 1971-2000



	VERANO (D _{n-1} E F _n)							OTOÑO (M _n A _n M _n)						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Abancay	23.3	0.8	0.7	0.6	0.9	0.8	0.7	23.0	0.3	0.6	0.8	1.1	0.9	0.7
Acomayo	20.4	0.6	0.5	0.8	0.9	0.8	0.7	20.6	0.8	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9
Ccatcca	14.7	0.6	0.2	0.6	0.9	0.9	0.6	15.2	1.2	0.7	0.8	0.7	1.1	0.9
Chalhuanca	23.3	0.4	0.3	0.6	0.6	0.8	0.5	22.6	0.7	0.7	1.1	0.5	1.1	0.8
Curahuasi	23.9	0.8	1.1	1.0	1.0	0.8	0.9	24.2	1.0	1.0	0.8	1.1	0.9	1.0
G. Kcayra	19.9	1.1	1.1	0.8	0.8	0.8	0.9	20.3	0.8	1.0	0.8	0.7	1.0	0.9
Sicuani	19.6	0.6	1.2	0.5	0.6	0.9	0.8	20.1	1.1	1.0	0.7	0.8	1.2	0.9
Urubamba	22.0	0.5	0.6	0.8	1.0	0.8	0.7	22.4	0.7	0.7	0.9	0.9	1.0	0.8

Tabla 16: Cambios en la temperatura máxima del aire promedio de VERANO y OTOÑO (°C) período 2030 relativo 1971-2000

	INVIERNO (J _n J _n A _n)							PRIMAVERA (S _n O _n N _n)						
	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO	NORMAL	CCSM3	HadCM3	ECHAM5	TL959L60	WRF	PROMEDIO
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Abancay	23.0	0.5	0.5	0.7	1.2	1.3	0.8	24.9	0.6	0.3	0.7	1.0	1.0	0.7
Acomayo	20.8	0.6	1.0	0.5	0.7	1.5	0.8	22.2	0.8	0.6	0.7	0.9	1.1	0.8
Ccatcca	15.3	1.1	0.7	0.9	0.7	1.4	1.0	15.8	0.4	0.5	0.6	0.9	1.0	0.7
Chalhuanca	22.8	0.5	0.7	0.2	1.0	1.4	0.8	24.6	0.8	0.5	0.4	0.9	1.0	0.7
Curahuasi	24.6	0.7	0.8	0.6	1.3	1.3	0.9	26.3	0.6	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9
G. Kcayra	20.4	0.6	0.8	0.5	0.5	1.4	0.8	21.4	0.5	0.6	0.7	0.6	1.0	0.7
Sicuani	20.0	0.5	0.9	0.7	1.1	1.4	0.9	21.1	0.8	0.6	1.0	0.9	1.1	0.9
Urubamba	22.2	1.1	0.5	0.6	1.2	1.3	0.9	23.1	0.9	0.9	0.7	1.0	1.0	0.9

Tabla 17: Cambios en la temperatura máxima del aire promedio de INVIERNO Y PRIMAVERA (°C) período 2030 relativo 1971-2000

4.3.4 Cambios espaciales en la temperatura máxima del aire a escala regional

En las figuras 34, 35, tabla 18, mapas 16-20 y 26-30 (ver anexo 8.1), se muestra a nivel espacial los cambios promedios de la temperatura máxima y mínima del aire en el período anual y estacional (DEF, MAM, JJA, SON) proyectados para el período 2030 relativo a la línea base climática 1971-2000, resultado del promedio de las simulaciones de dos modelos dinámicos (TL959L60, WRF) y tres modelos regionalizados estadísticamente (CCSM3, HadCM3, ECHAM5-OM).

En el período anual se proyecta incrementos en la temperatura máxima del aire entre 0.7 y 1.2°C en todo el espacio geográfico de las regiones Cusco y Apurímac, el cual representa un incremento relativamente alto principalmente al sur de ambas regiones en las provincias Apurimeñas de Antabamba, Cotabambas y provincias Cusqueñas de Chumbivilcas, Canas y Espinar.

En el verano (DEF) en el cual ocurren comúnmente las mayores precipitaciones, los incrementos de temperatura máxima son en general menores en comparación al resto de estaciones del año, entre 0.5 y llegando hasta un 1.0°C; en las provincias cusqueñas de Chumbivilcas, Espinar, Canas, Paucartambo, Calca, zona oeste de la Convención y en las provincias de la región Apurímac, Chincheros, Grau, Cotabambas, Antabamba y zona este de Abancay, principalmente.

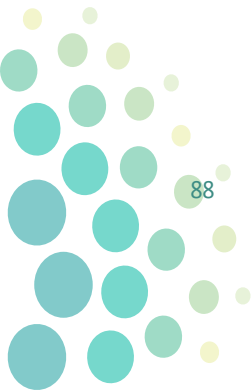
En el otoño (MAM) al igual que en el periodo anual las temperaturas se proyectan entre 0.7 y 1.2°C en todo el espacio geográfico de las regiones Cusco y Apurímac, y principalmente al sur de ambas regiones.

En el invierno (JJA) se proyectan los mayores incrementos de temperatura máxima hasta de 1.6°C principalmente en las provincias del este de Apurímac (Antabamba, Cotabambas, Grau) y sur de Cusco (Chumbivilcas y Espinar). Estas altas proyecciones de calentamiento del aire y por consiguiente de la superficie terrestre adyacente, y sumado a ello la menor cobertura vegetal en esta época del año podrían dar lugar al aumento de la intensidad de vientos e incremento de la evapotranspiración con efectos erosivos sobre los suelos en estas provincias andinas.

En la primavera (SON) los aumentos llegarían hasta 1.4°C en la provincia La Convención, en Cusco. La característica termal de incrementos de temperatura máxima del aire cerca de 2°C principalmente en los trimestres SON, DEF, MAM, en el ámbito espacial de Cusco y Apurímac, podrían tener efectos relevantes sobre la biodiversidad y en el rendimiento y calidad de los cultivos en ambas zonas de estudio.

REGION	DIVISION	ZONA	Δ CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MAXIMA				
			(°C)				
			ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON
CUSCO	Selva	Norte (1)	0.6 a 1.0	0.5 a 1.0	0.8 a 1.0	0.8 a 1.2	0.8 a 1.3
		Centro (6)	0.8 a 1.2	0.6 a 1.0	0.6 a 1.0	1.0 a 1.2	0.8 a 1.3
		Norte Occidental (2)	1.0 a 1.2	0.6 a 0.8	0.8 a 1.2	1.0 a 1.2	0.8 a 1.3
	Sierra	Oriental (3)	0.8 a 1.0	0.6 a 1.0	0.6 a 1.0	0.8 a 1.2	0.8 a 1.3
		Centro Occidental (4)	0.6 a 1.2	0.6 a 1.0	0.6 a 1.2	0.6 a 1.4	0.6 a 1.2
		Oriental (5)	0.6 a 1.2	0.5 a 1.0	0.8 a 1.2	0.8 a 1.2	0.6 a 1.2
		Sur (7)	0.8 a 1.2	0.6 a 1.0	0.8 a 1.2	0.8 a 1.5	0.8 a 1.2
APURIMAC	Sierra	Norte (8)	0.6 a 1.2	0.5 a 1.0	0.6 a 1.2	0.6 a 1.4	0.8 a 1.2
		Centro (9)	0.6 a 1.2	0.5 a 1.0	0.6 a 1.0	0.6 a 1.4	0.8 a 1.2
		Sur (10)	0.6 a 1.2	0.5 a 1.0	0.6 a 1.2	0.6 a 1.4	0.8 a 1.2

Tabla 18: Cambio promedio en la temperatura máxima a escala regional (°C) período 2030 relativo 1971-2000.



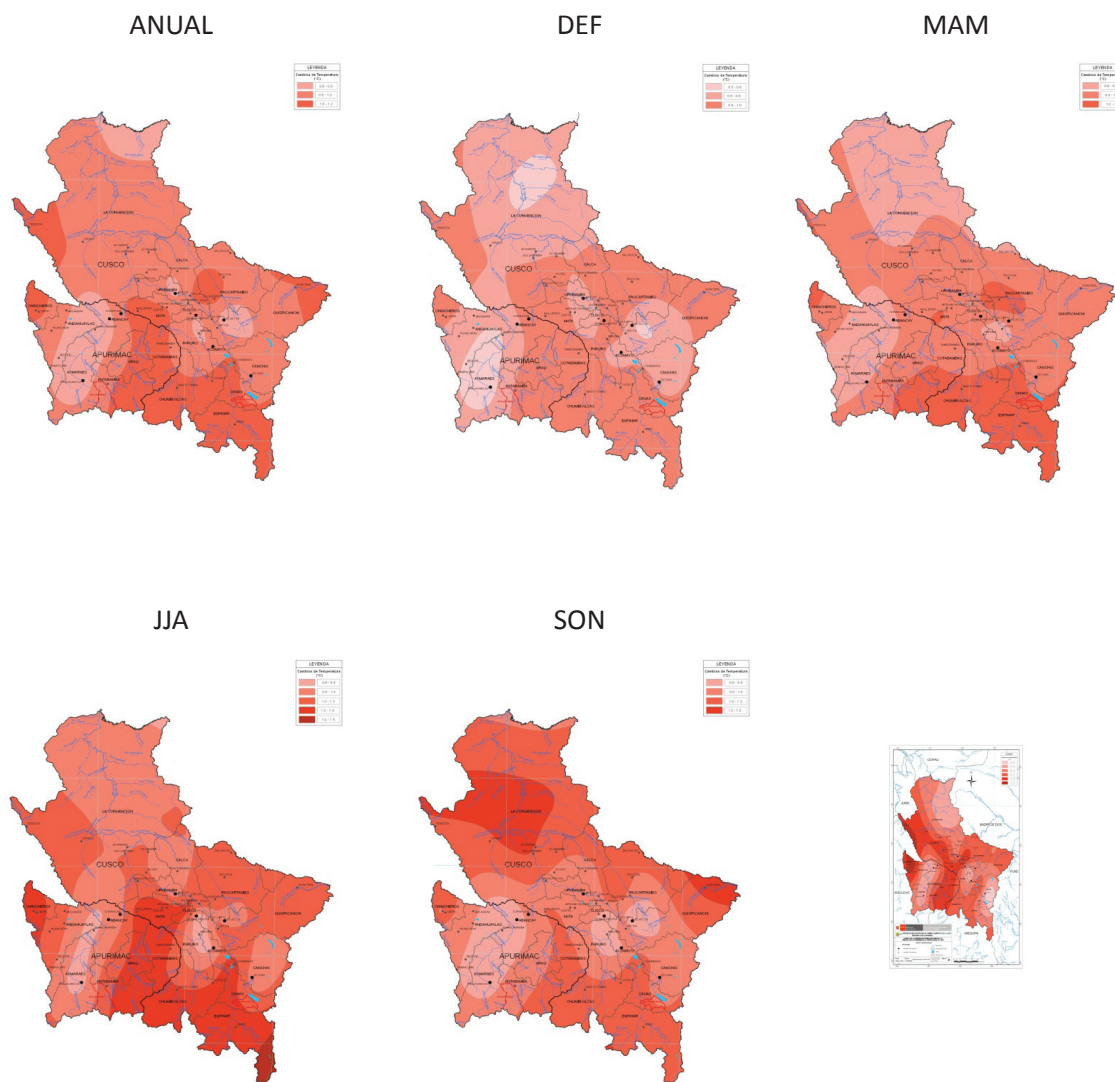


Figura 34: Cambio promedio en la temperatura máxima a escala regional (°C) período 2030 relativo 1971-2000, proyección promedio de los modelos dinámicos (TL96969L60 y WRF-ECHAM5-OM) y estadísticos (CCSM3, ECHAM5-OM, HadCM3)

4.3.5 Cambios en la temperatura mínima del aire a escala regional

En el período *anual*, se proyectan incrementos de temperatura mínima en las regiones de estudio, llegando hasta 1.3°C en el extremo noroeste de la provincia La Convención en Cusco y la provincia de Chincheros y Antabamba en Apurímac.

En el trimestre DEF, la temperatura mínima muestra un comportamiento bastante similar al promedio anual, llegando hasta 1.3°C en el noroeste de la provincia La Convención en Cusco y la provincia de Antabamba en Apurímac. Los menores incrementos se localizan en la provincia de Abancay, la provincia de Canchis y la zona noreste de La Convención.

En el trimestre MAM las temperaturas mínimas son las que más incrementos muestran en relación a las temperaturas máximas; los valores llegan hasta 1.5 °C y puede considerarse muy alto en relación a los cambios regionales o globales. Estos incrementos de temperatura mínima podrían estar asociados a precipitaciones más frecuentes o intensas que se verían reflejados en los totales acumulados en este trimestre (período de finalización de lluvias); principalmente al oeste de Cusco en la provincia La Convención y provincias de Anta y Cusco. Asimismo, en las provincias de Chincheros y Andahuaylas ubicadas en el noroeste y provincia de Antabamba ubicadas en el sureste de Apurímac.

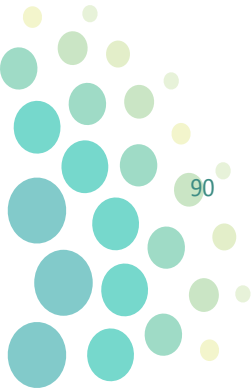
En el trimestre JJA las temperaturas mínimas muestran los mayores incrementos llegando hasta 1.4°C en las provincias de Grau, Cotabambas y Antabamba en Apurímac y hasta 1.5° en las provincias Canas, Chumbivilcas y principalmente en el extremo sur este de Espinar, en Cusco. Esta nueva característica termal durante el período de estiaje; indicaría heladas menos frecuentes e intensas lo cual es coherente con los resultados indicados en 4.2.2 y la figura 35, así como también podrían ser relevantes sobre los nevados en la cordillera del Vilcabamba en Cusco, principalmente.

En el trimestre SON, los incrementos de la temperatura llegan hasta 1.4°C en la zona oeste de la provincia La Convención en Cusco y la provincia de Chincheros en Apurímac.

En la tabla 19 se presenta los cambios de la temperatura mínima del aire en °C según la división de las regiones de estudio (figura 23 a) basada en zonas climatológicamente homogéneas.

REGION	DIVISION	ZONAS	Δ CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MINIMA					
			(°C)					
			ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON	
CUSCO	Selva	Norte (1)	0.8 a 1.2	0.6 a 1.2	0.6 a 1.4	1.0 a 1.4	0.8 a 1.2	
		Centro (6)	0.8 a 1.2	0.8 a 1.2	0.6 a 1.2	1.0 a 1.2	0.8 a 1.2	
		Norte	Occidental (2)	0.8 a 1.3	1.0 a 1.3	1.2 a 1.5	1.2 a 1.4	1.0 a 1.4
			Oriental (3)	0.8 a 1.2	0.6 a 1.2	0.6 a 1.2	0.8 a 1.2	0.8 a 1.2
		Centro	Occidental (4)	0.8 a 1.2	0.8 a 1.2	0.6 a 1.4	0.6 a 1.2	0.8 a 1.2
			Oriental (5)	0.8 a 1.2	0.8 a 1.2	0.8 a 1.4	0.8 a 1.0	0.8 a 1.2
	Sierra	Sur (7)	0.6 a 1.3	0.6 a 1.3	0.4 a 1.2	0.5 a 1.4	0.6 a 1.2	
APURIMAC	Sierra	Norte (8)	0.6 a 1.3	0.6 a 1.2	0.6 a 1.5	0.5 a 1.4	0.6 a 1.4	
		Centro (9)	0.6 a 1.2	0.6 a 1.2	0.6 a 1.4	0.6 a 1.2	0.6 a 1.2	
		Sur (10)	0.6 a 1.3	0.6 a 1.3	0.6 a 1.4	0.6 a 1.4	0.6 a 1.2	

Tabla 19: Cambio promedio en la temperatura mínima a escala regional (°C) período 2030 relativo 1971-2000.



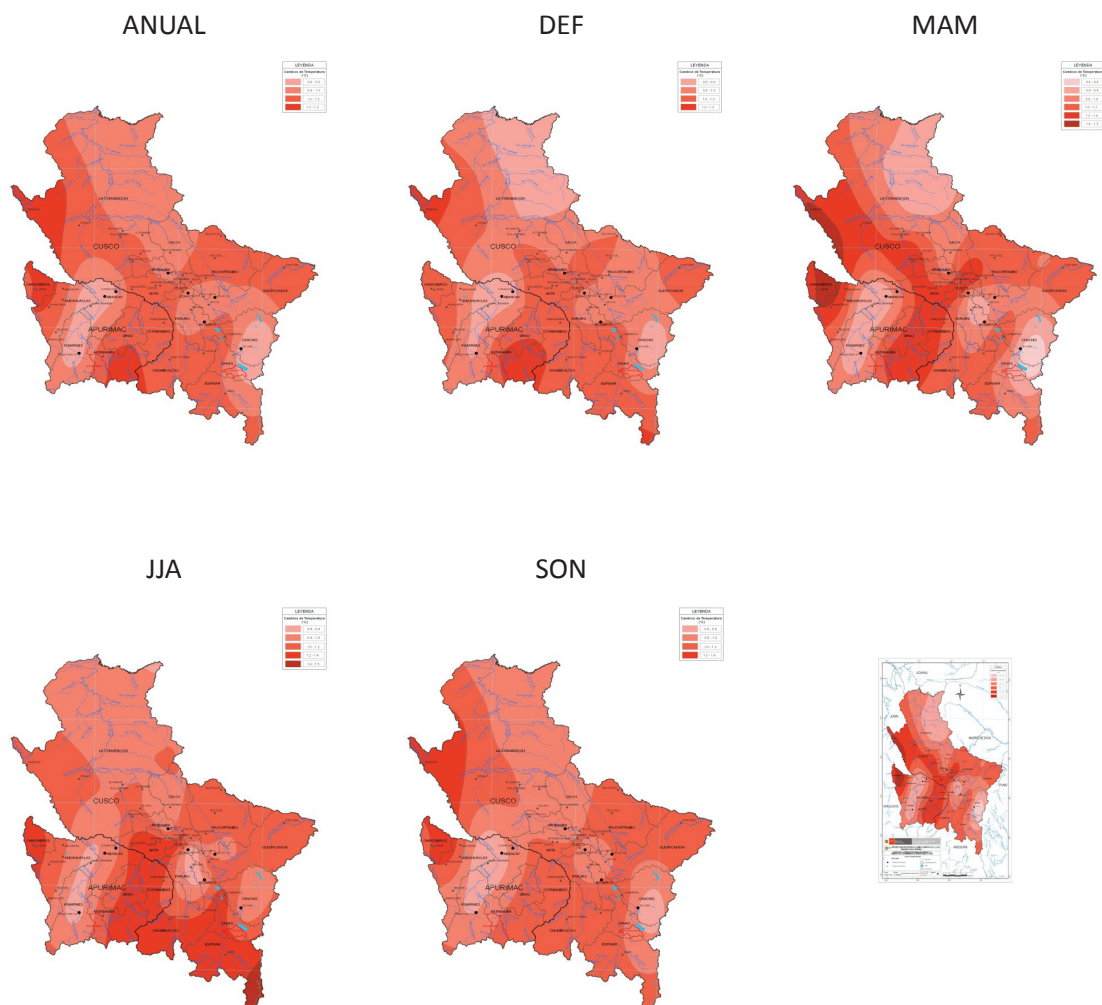


Figura 35: Cambio promedio en la temperatura mínima a escala regional (°C) período 2030 relativo 1971-2000, proyección promedio de los modelos dinámicos (TL96969L60 y WRF-ECHAM5-OM) y estadísticos (CCSM3, ECHAM5-OM, HadCM3).

4.4 Índices de extremos climáticos de precipitación y temperatura proyectada para el período 2030

Los riesgos de desastres por eventos extremos de temperatura y precipitación, son fenómenos crecientes que viene sucediéndose a nivel mundial, tienen impacto directo en la población, con daños en la economía, afectan la agricultura con pérdidas de los cultivos de seguridad alimentaria y los recursos hídricos con reducción de la disponibilidad de agua, entre otros. “En el 2007 alrededor de 45% de las muertes registradas y cerca del 70% del total de pérdidas económicas, fueron debido a los desastres inducidos por el clima” FAO, 2011. Sin ir muy lejos, las lluvias que ocurrieron en Cusco entre enero y febrero del año 2010 dejaron pérdidas económicas de más de 700 millones de soles, Lavado et al. 2010. “Estos patrones de amenazas climáticas están aconteciendo en distintas regiones y se presume que estén asociados al cambio climático, y se espera que el calentamiento global, amplíe los rangos climáticos, acelere el ciclo hidrológico llevando a eventos de fuertes lluvias y severas sequías”, FAO, 2011

En este contexto se ha determinado los índices climáticos de extremos de precipitación y temperatura para tres localidades en la región Apurímac (Abancay, Curahuasi, Chalhuanca) y siete en Cusco (Urubamba, Pisac, Cay Cay, Granja Kcayra, Ccatcca, Acomayo, Sicuani). La tendencia anual futura de índices de extremos precipitación y temperatura a escala diaria fueron evaluados a partir de la consistencia de dos modelos dinámicos climáticos: TL959L60 MRI/JMA y WRF3.2.

4.4.1 Índices de extremos climáticos de precipitación

Los resultados muestran para el período 2030 un consistente aumento pero sin significancia estadística de la intensidad diaria de la precipitación anual (SDII) y los días muy lluviosos (R95p), en *Urubamba*, Pisac, Cay Cay, Granja Kcayra, Ccatcca, Sicuani (Cusco) y *Curahuasi*, Abancay (Apurímac) en promedio de 0.1 mm/día/década y 9 mm/década, respectivamente.

Sin embargo, en la localidad de Acomayo se proyecta una consistente disminución sin significancia estadística tanto de la intensidad (0.1 mm/día/década) así como los días muy lluviosos (6.5 mm/día/década), comportamiento que podría estar influenciado en mayor medida por los efectos locales (orografía, urbanismo, cambios en el uso de la tierra entre otros).

Otros índices extremos de precipitación como: Días extremadamente húmedos (R99p) y Precipitación total anual en días húmedos (PRCTOT), presentan en líneas generales un comportamiento regional consistente de aumento en promedio de 5.2 mm/década y 19.8 mm/década, respectivamente; sin significancia estadística en Abancay, Granja Kcayra, Cay Cay y Ccatcca. En tanto, Pisac (en PRCTOT) muestra significancia con aumentos del orden 27.3 mm/década. Si bien en los últimos 44 años esta localidad presentaba disminución (en PRCTOT) de 19 mm/década, en el futuro se proyecta aumentos en 6 mm/década.

Al evaluar las tasas de incremento de los días muy lluviosos (R95p) y extremadamente lluviosos (R99p), los días muy lluviosos estarían aumentando en 9 días/década y los días extremadamente lluviosos en 5 días/década ambos sin significancia estadística, comportamiento que se viene presentando en los últimos 44 años, donde la frecuencia de ocurrencia de los días muy lluviosos es mayor a la de los días extremadamente lluviosos.

De otro lado, la tendencia de los días consecutivos con precipitación (CWD), presentan de forma consistente un comportamiento regional de aumento pero sin significancia estadística en promedio de 3 días/década en las localidades Chalhuanca (Apurímac), Urubamba, Granja Kcayra, Ccatcca, Acomayo y Cay cay (Cusco). En esta última localidad en los últimos 44 años el CWD viene incrementándose significativamente en 2 días, en el futuro este comportamiento se mantendría pero sin significancia. Lo cual se muestra espacialmente en la figura 36 y los valores en la tabla 20.

Con respecto a la tendencia del índice máximo número de días consecutivos secos o períodos secos (CDD) no muestra consistencia cuando se realiza el consenso de los modelos dinámicos (TL959L60, WRF) en las localidades analizadas. De otro lado, es decir que existe alta incertidumbre del comportamiento futuro de la frecuencia de días consecutivos secos que podrían ser de aumento o reducción, respecto a la tendencia actual de reducción de CDD. Dicho de otro modo existe igual probabilidad de que los días consecutivos secos disminuyan o aumentan, en relación a lo que se viene presentando actualmente. Los efectos de CDD en el futuro estarían asociados con la longitud incierta de la duración de los veranillos⁴ y periodos secos,

4

En este estudio un período de veranillo en las regiones de Cusco y Apurímac se conceptualiza como un intervalo de diez días con déficits de lluvias (cero o muy escasas en comparación con su valor climatológico) en la temporada de mayores lluvias, DEFM. (Alarcón, C. 2010,

comportamiento que se manifestaría de forma regional.

En tanto, en la localidad de Abancay el CDD indica de forma consistente, la reducción de los días consecutivos secos, se mantendrían en el futuro 2030.

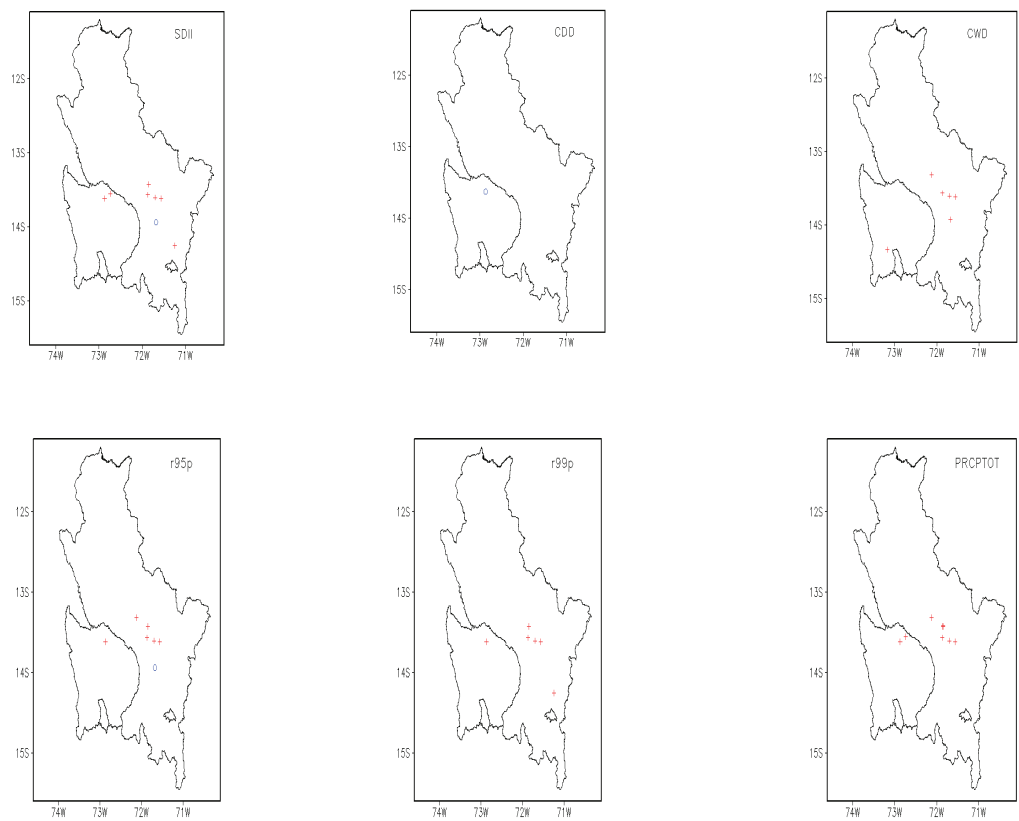


Figura 36: Señal de tendencia de índices de extremos de precipitación proyectada para el período 2030 que abarca desde 2016 al 2044, tomando como base la consistencia de los modelos WRF y TL959L60 MRI/JMA. El aumento es mostrado por el símbolo (+) y la disminución por (0) sin significancia estadística. Símbolos en negrita (+, 0) indican significancia estadística al nivel de confianza de 99%. Algunas localidades de las 10 estudiadas no muestran consistencia en la señal de tendencia proyectada, por lo tanto no aparecen graficadas en la distribución espacial.

Los signos de aumento (+) y disminución (0) y el valor de la tendencia de los extremos de precipitación se visualiza en la tabla 20.

			SDII	CWD	R95p	R99p	PRCPTOT
			mm/día/ década	días/ década	mm/década	mm/década	mm/ década
CUSCO	Norte	Urubamba	478.9	+	+		+
				2	5.1		7.3
		Acomayo	859.4	0	+	0	
				0.14	8	6.5	
		Cay Cay	317.0	+	+	+	+
				0.12	2	9.1	19.2
		Ccatcca	589.0	+	+	+	+
				0.21	4	16.8	39.5
	Centro	G. Kcayra	667.1	+	+	+	+
				0.1	3	12.5	26.7
		Pisac	564.4	+	+	+	+
				0.1	11.4	6.5	27.3
	Sur	Sicuani	597.6	+		+	
				0.04		4.8	
APURIMAC	Norte	Abancay	661.9	+	+	+	+
				0.13	13.7	8.8	29.4
		Curahuasi	582.9	+			+
				0.05			9.1
	Sur	Chalhuanca	765.3		+		
				3			
PROMEDIO			608.4	0.07	4	9	5
							19.8

Tabla 20: Valor y señal de la tendencia anual de los índices extremos de precipitación futura. Período 2016 - 2044. Consistencia de modelos dinámicos TL959L60 y WRF.

La señal de tendencia de aumento es mostrado por el símbolo (+) y la disminución por (0) sin significancia estadística. Símbolos en negrita (+, 0) indican significancia estadística al nivel de confianza de 99%. Algunas localidades de las 10 estudiadas no muestran consistencia en la señal de tendencia de los modelos evaluados TL959L60 y WRF, por lo tanto las celdas vacías indican que no hay consistencia. **NS** indica que no hay señal de tendencia o que la tendencia es nula.

4.4.2 Índices de extremos climáticos de temperatura

El comportamiento de las tendencias de siete índices extremos de temperaturas y su significancia estadística al 99% de nivel de confianza fueron determinadas para las localidades andinas de las regiones Cusco y Apurímac, los resultados son mostrados en la tabla 21 y figura 37. Estos índices se basan en el análisis de las temperaturas máximas y mínimas del aire anual de escala diaria. Las tendencias de los índices extremos de temperatura al igual que la precipitación, fueron determinadas para el período 2016-2044.

Cuatro de estos índices relacionan eventos extremos de temperatura futura basados en percentiles: Días fríos (Tx10p), Días calientes (Tx 90p), Noches frías (Tn10p), Noches calientes (Tn90p), dos relacionan la tendencia del valor máximo de la temperatura máxima (Txx) y la tendencia del valor mínimo de la temperatura mínima

(Tnn) del aire. Mientras FDO representa la tendencia de la frecuencia de los días de heladas meteorológicas (temperatura mínima del aire menor a 0°C).

Los resultados indican que la tendencia de la temperatura máxima máxima del aire (Txx) en el futuro, mostraría un consistente aumento (0.4°C/década) con significancia estadística en Urubamba y Sicuani, y sin significancia en Curahuasi. Otras localidades como Abancay, Chalhuanca y Ccatcca, en el clima actual vienen mostrando tendencia de disminución, en el futuro se proyectan aumentos significativos de 0.4°C/década. Por otro lado, Granja Kcayra y Acomayo, no muestran una señal clara de tendencia de Txx en el futuro.

En el análisis de índices basados en percentiles, el número de días muy fríos (Tx10p), en las localidades de Apurímac y Cusco, muestra disminución en 3 días/década con significancia estadística al 99%, es decir los días fríos en el futuro en promedio disminuirían en las localidades evaluadas. Si bien en los últimos 44 años este comportamiento se viene observando en Granja Kcayra y Ccatcca, en el futuro esta disminución de los días muy fríos podría mantenerse y generalizarse de forma regional (ver figura 37).

De otro lado, la tendencia futura de los días cálidos (TX90p) muestra aumentos (4 días/década) con significancia estadística en Abancay, Curahuasi, Chalhuanca, Acomayo, Sicuani y de forma sostenida se mantendría en Granja Kcayra (Cusco) con formación de isla de calor en esta localidad, ver figura 37 y capítulo 4. Asimismo, cabe señalar, el patrón de tendencias de los días cálidos muestra un comportamiento inverso a los días fríos (Tx10p) como era de esperarse, lo cual se visualiza y confirma en la figura 37 y tabla 21.

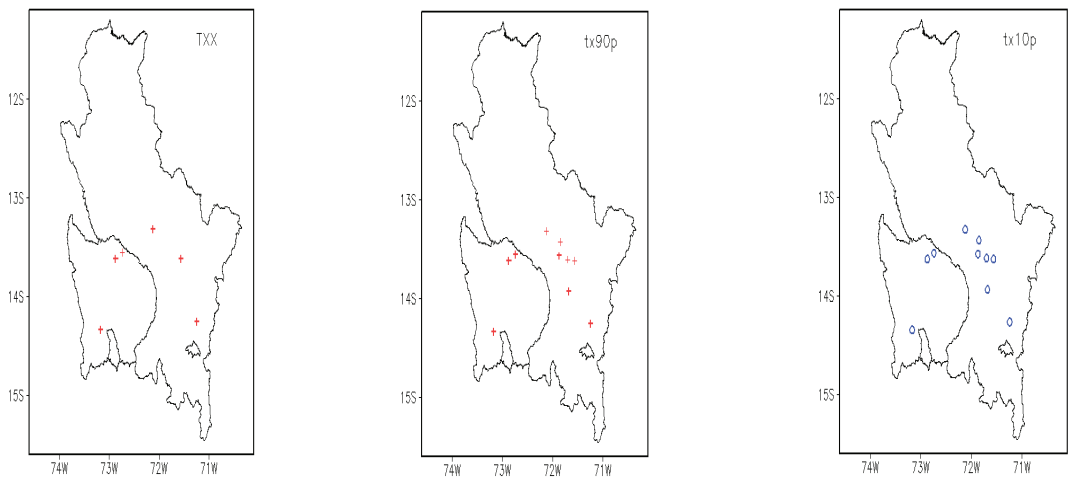


Figura 37: Señal de tendencia de índices de extremos de temperatura máxima del aire para el período 2030 que abarca desde 2016 el 2044 tomando como base la consistencia de los modelos WRF y TL959L60 MRI/JMA. El aumento es mostrado por el símbolo (+) y la disminución por (0) sin significancia estadística. Símbolos en negrita (+, 0) indican significancia estadística al nivel de confianza de 99%. Algunas localidades estudiadas no muestran consistencia en la señal de tendencia y/o los índices, por lo tanto no aparecen en la figura.

La evaluación de los índices basados en las temperaturas mínimas diarias se muestran en la figura 38, donde la tendencia del índice de la temperatura mínima mínima del aire (Tnn), proyectan en general, en promedio un comportamiento de incremento (0.3 °C/década) en todas las localidades analizadas de Cusco y Apurímac y con alta significancia estadística en Cay Cay (0.4°C/década), es decir las noches frías estarían tornándose a ser menos frías principalmente en esta localidad. De otro lado, en Sicuani (Cusco) y las estaciones de Apurímac,

en el clima actual presentan una significativa disminución en la intensidad de este índice donde las noches son más frías, en el futuro cercano se estima que las noches frías tenderán a ser menos frías, aunque sin significancia estadística.

En el análisis basado en percentiles (figura 38), la ocurrencia de eventos extremos en el futuro como el número de días con noches frías (Tn10p) estarían disminuyendo (5 días/década) con alto nivel de significancia estadística en el ámbito de localidades analizadas. Este comportamiento de disminución de la frecuencia de noches frías se viene observando de forma significativa en clima actual en Granja Kcayra y Ccatcca y en el futuro se generalizarían en el ámbito regional.

Por otro lado, se proyecta para el futuro el aumento del número de días con noches cálidas (Tn90p) en todas las estaciones analizadas en promedio de 6 días/década con alta significancia estadística, excepto la localidad de Sicuani que muestra aumentos pero sin significancia.

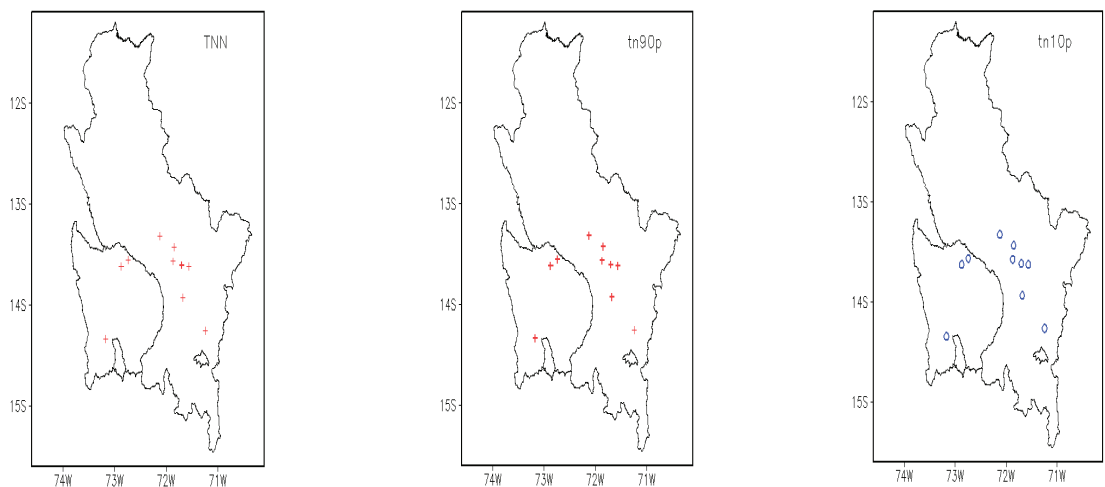


Figura 38: Señal de tendencia de índices de extremos de temperatura mínima del aire para el período 2030 que abarca desde 2016 el 2044 tomando como base la consistencia de los modelos WRF y TL959L60 MRI/JMA. El aumento es mostrado por el símbolo (+) y la disminución por (0) sin significancia estadística. Símbolos en negrita (+, 0) indican significancia estadística al nivel de confianza de 99%. Algunas localidades estudiadas no muestran consistencia en la señal de tendencia y/o los índices, por lo tanto no aparecen en la figura.

Las tendencias de aumento del valor mínimo de la temperatura mínima y la frecuencia de las noches frías podrían ser relevantes para cultivos que requieran de temperaturas frías, en las localidades estudiadas.

			Temperatura máxima del				Temperatura mínima del					
			aire				aire					
			T _{máx}	T _{mín}	Txx °C/ década	Tx10p días/ década	Tx90p días/ década	Tnn °C/ década	Tn10p días/ década	Tn90p días/ década	FDO días/ década	
CUSCO	Norte	Urubamba	22.7	6.4	+	0	+	+	0	+		
					0.36	4	4	0.24	5	6		
	Centro	Acomayo	21.0	5.1		0	+	+	0	+	0	
						4	4	0.26	5	6	1	
		Cay Cay	21.7	6.2		0	+	+	0	+	NS	
						3	3	0.36	5	6	0	
		Ccatcca	15.3	1.0	+	0	+	+	0	+	0	
					0.36	3	3	0.37	5	6	6	
		G. kcayra	20.5	3.7		0	+	+	0	+	0	
						3	3	0.31	5	6	6	
	Pisac	22.6	7.9		0	+	+	0	+	NS		
					3	4	0.35	5	6	0		
Sur	Sicuani	20.2	2.3	+	0	+	+	0	+	0		
				0.53	4	5	0.45	5	6	7		
APURIMAC	Norte	Abancay	23.6	11.2	+	0	+	+	0	+	NS	
						0.4	3	5	0.26	5	6	0
					Curahuasi	24.7	10.5	+	0	+	+	0
		0.31	3	5	0.2			5	6	0		
	Sur	Chalhuanca	23.3	6.8	+	0	+	+	0	+	NS	
						0.44	4	3	0.27	4	6	0
PROMEDIO					0.4	3	4	0.3	5	6	5	

Tabla 21: Valor y señal de la tendencia de los índices extremos de temperatura futura. Período 2016 - 2044. Consistencia de modelos dinámicos TL959L60 y WRF.

La señal de tendencia de aumento es mostrado por el símbolo (+) y la disminución por (0) sin significancia estadística. Símbolos en negrita (+, 0) indican significancia estadística al nivel de confianza de 99%. Algunas localidades de las 10 estudiadas no muestran consistencia en la señal de tendencia de los modelos evaluados TL959L60 y WRF, por lo tanto las celdas vacías indican que no hay consistencia. NS indica que no hay señal de tendencia o que la tendencia es nula.

Los resultados de las tendencias futuras del índice FDO que relaciona la tendencia de los días de heladas meteorológicas (temperatura mínima < 0°C), muestra en general una tendencia de disminución de 5 días/década en las localidades de la región Cusco (ver figura 39), siendo estadísticamente significativa en Granja Kcayra, Ccatcca, Sicuani y no significativa en Acomayo, donde la tendencia de aumento de los valores mínimos de la temperatura mínima (Tnn) estaría modulando la longitud del período de heladas. Esta disminución de la frecuencia de heladas se viene observando en los últimos 45 años en gran parte de las localidades de Cusco. A excepción de Sicuani y Chalhuanca que vienen presentando aumentos significativos (12 días/década) y en el futuro, este comportamiento experimentaría cambios en Sicuani con la disminución de la frecuencia de los días de heladas en 7 días/década con alto nivel de significancia. De otro lado en Chalhuanca, de forma consistente no hay señal de tendencia de FDO, esto se puede interpretar que los días con heladas no mostraría cambios o posiblemente desaparecerían en el futuro, que es coherente con la tendencia de aumento de los valores mínimos de la temperatura mínima del aire y la disminución significativa de los días fríos en el 2030.

La tendencia de cambios en los extremos de temperaturas máxima y mínima del aire en el futuro podría ser relevante en el rendimiento de los cultivos de seguridad alimentaria (papa, trigo, cebada, habas y maíz) y de comercialización en las regiones de estudio. Así como también con efectos en los pastizales y en el sector pecuario.

Respecto al rango diurno de temperaturas (DTR), que es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria, no hay consistencia entre los modelos TL959L60 y WRF en la proyección de este índice en el total de localidades estudiadas (por lo que no se ha procedido a graficar). Es decir que la incertidumbre es alta, ya que existe la misma posibilidad de que el DTR a escala local se mantenga en el futuro con decrecimiento (similar al comportamiento observado en los últimos 44 años) o que el DTR se incremente, es decir que el calentamiento de las temperaturas mínimas en la escala anual diaria sea mayor a las máximas, o viceversa.

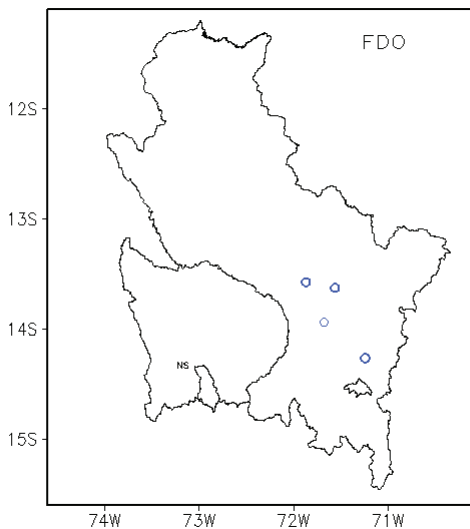


Figura 39: Señal de tendencia del índice de heladas meteorológicas FDO, ambos proyectados para el período 2030 que abarca desde 2016 el 2044 tomando como base la consistencia de los modelos WRF y TL959L60 MRI/JMA. El aumento es mostrado por el símbolo (+) y la disminución por (0) sin significancia estadística. Símbolos en negrita (+, 0) indican significancia al nivel de confianza de 99%. NS indica que no hay señal de tendencia o que la tendencia es nula. Cabe señalar que algunas localidades estudiadas no muestran consistencia en la señal de tendencia y/o los índices, por lo tanto no aparecen en la figura.

4.5 Proyecciones regionalizadas para Cusco y Apurímac 2050

Con el fin de dar una visión general de la evolución futura al 2050 de la precipitación y temperaturas resultado de un único modelo regional (WRF) procesado para el periodo 2050 en SENAMHI, se ha representado a nivel espacial las proyecciones en la escala regional y temporal: promedio anual y estacional (DEF, MAM, JJA y SON).

4.5.1 Cambios en la precipitación 2050 a escala Regional

Los cambios en la precipitación promedio anual para el periodo 2050 relativo al periodo 1971-2000, indican en general, un comportamiento dentro de su variabilidad normal actual, es decir con ligeros aumentos y deficiencias menores al 15%, en gran parte de las regiones; a excepción del extremo sur de la región Cusco y suroeste de la región Apurímac, donde el déficit llega hasta 30%, mientras en la confluencia de las provincias de Calca, Quispicanchis, Cusco y Paucartambo, los aumentos llegarían hasta 30%, ver figura 40 a.

En el verano (período de mayores precipitaciones DEF) en general, las precipitaciones se mantienen similares al comportamiento promedio anual (ver figura 40), con la presencia de un nuevo núcleo de superávit ubicado sobre las provincias de Andahuaylas y Abancay, con valores importantes que alcanzan hasta 30% sobre el valor normal actual.

En el otoño (período de finalización de precipitaciones MAM) se observan incrementos hasta de 75% relativo al clima actual en la frontera de las provincias de Paucartambo, Calca, Cusco, Paruro, Quispicanchis en Cusco; en tanto en las provincias de Abancay, Andahuaylas y Chincheros en Apurímac; llegarían hasta 30%. En el resto del ámbito de estudio, las precipitaciones se presentarían dentro de la variabilidad normal actual de lluvias de $\pm 15\%$, manteniéndose el déficit en el extremo sur de ambas regiones entre 15 y 30 %.

En invierno (período de estiaje JJA), se observa los mayores déficit de precipitación en gran parte del ámbito geográfico de Cusco y Apurímac, principalmente en la zona andina de las regiones de estudio, en las provincias de Cotabambas, Grau, en Apurímac en las cuales el déficit alcanza hasta 75%. Similar comportamiento se observa en las provincias de Chumbivilcas, Paruro, Canas, Canchis, en Cusco, la cual es coherente con los resultados obtenidos en otros estudios⁵, donde las disminuciones alcanzan hasta el 60%. Cabe señalar que las precipitaciones actuales en ésta época del año son relativamente bajas.

En primavera (período de inicio de precipitaciones SON) las disminuciones son también importantes, alcanzando valores de 45% lo cual se puede visualizar en la figura 40b.

En términos generales en el periodo 2050, aparentemente hay una tendencia de disminución de las precipitaciones en el sur de las regiones Cusco y Apurímac, manifestándose de forma más regional y acentuándose en la estación seca (JJA). También es importante resaltar el incremento importante de las precipitaciones en la zona central de Cusco (Cuenca media del río Vilcanota) principalmente en el periodo de finalización de precipitaciones (MAM).

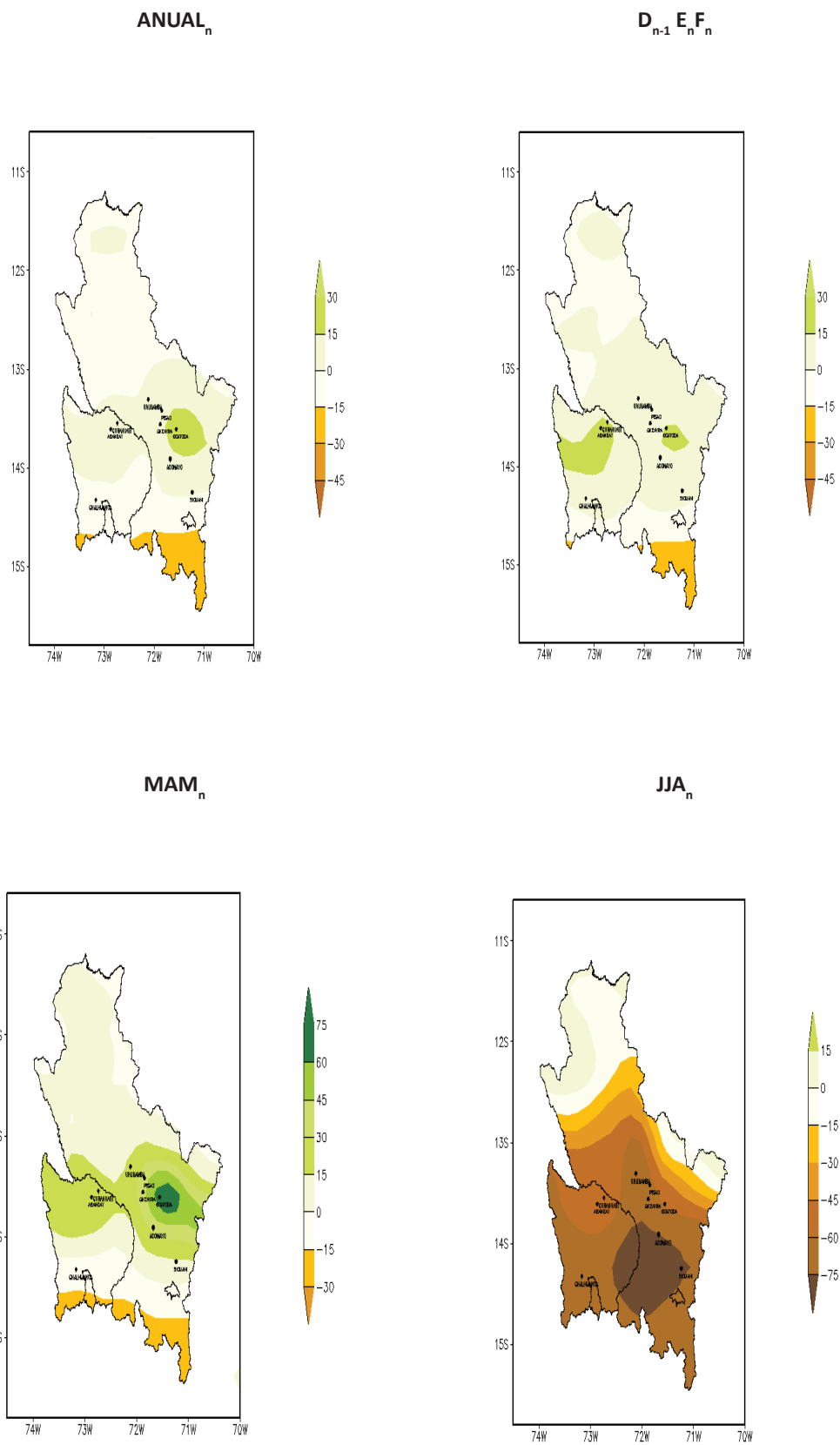


Figura 40 a: Cambios promedio en la precipitación a escala regional (%) período 2050 relativo 1971-2000, periodo anual, DEF, MAM, JJA proyección del modelo WRF.

SON_n

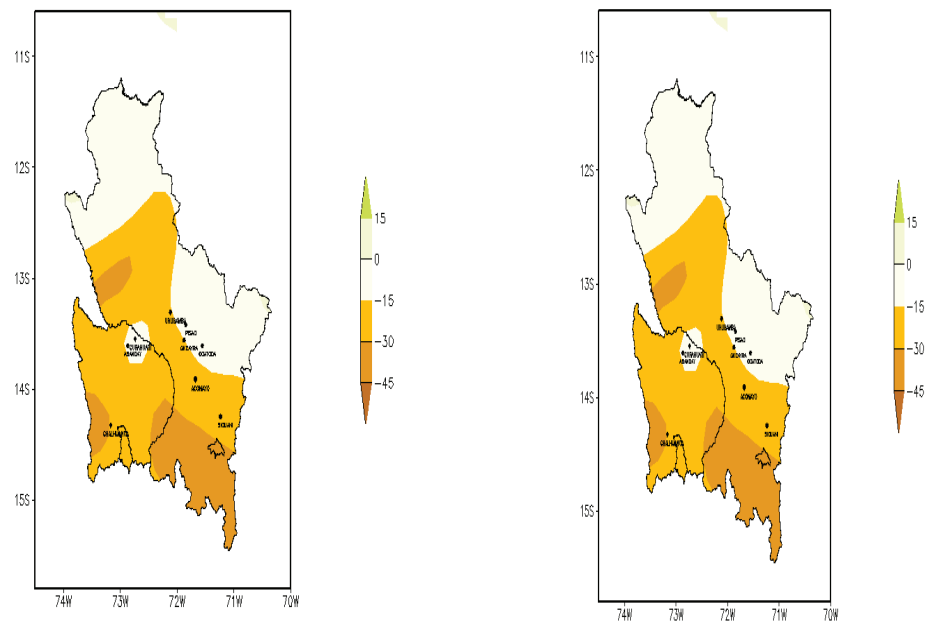


Figura 40 b: Cambios en la precipitación a escala regional (%) período 2050 relativo 1971-2000, periodo SON, proyección del modelo WRF.

4.5.2 Cambios en la temperatura máxima proyectada a escala regional para el período 2050

En la figura 41 (a y b) se muestra a nivel espacial los cambios promedios de la temperatura máxima del aire, promedio anual y estacional (DEF, MAM, JJA, SON) proyectada para el período 2050 relativo a la línea base climática 1971-2000.

El cambio de temperatura máxima promedio anual del escenario A1B relativo al clima actual proyectan incrementos importantes entre 1.4 y 2.2°C en todo el espacio geográfico de las regiones Cusco y Apurímac, el cual representa un incremento alto principalmente en el sur y extremo este de la región Cusco.

En verano (DEF) en el cual ocurren comúnmente las mayores precipitaciones, los incrementos de temperatura máxima son en general menores en comparación al resto de estaciones del año, observándose incrementos desde 1.2 hasta 2.0°C; en las regiones de estudio. Los mayores incrementos de temperatura se observan en la zona sur de Cusco y los menores en la zona centro y norte de las regiones.

En otoño (MAM) las temperaturas muestran distribución espacial parecida al promedio anual con incrementos que van desde 1.4 hasta 2.2°C. Los mayores incrementos se observan en la zona sur de Cusco y los menores incrementos en la zona norte, igual que en la región Apurímac.

En invierno (JJA) se proyectan los mayores incrementos de temperatura máxima en relación a las otras estaciones del año, desde 1.6°C en el extremo noreste de la región Cusco hasta 2.4°C en la zona noroeste de Cusco y zona sur de las regiones. En tanto en la zona centro de Cusco y norte de Apurímac se esperan incrementos de 2 a 2.2°C.

En primavera (SON) los aumentos llegarían hasta 1.8°C en zona sur y norte de la región Apurímac y hasta 2.4°C en la zona noroeste y extremo sur este de la región Cusco.

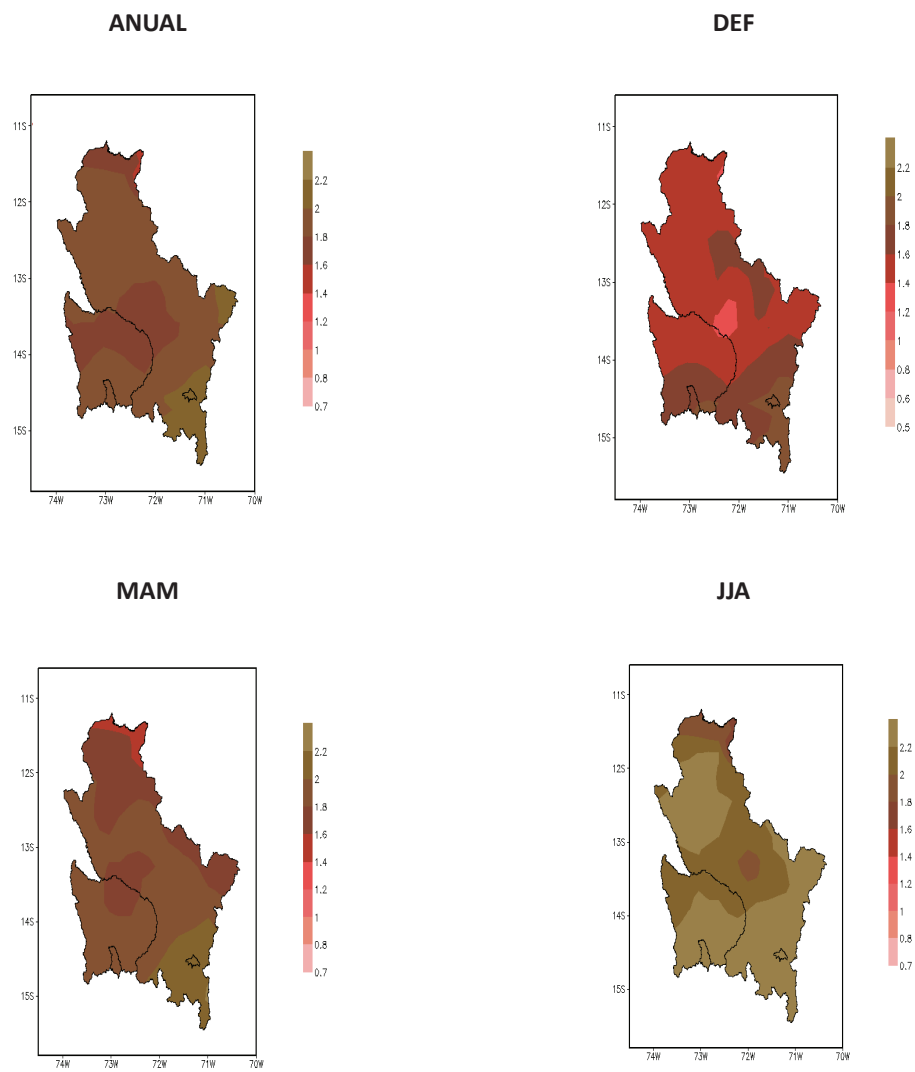


Figura 41 a: Cambios en la temperatura máxima del aire a escala regional (%) periodo anual, DEF, MAM, JJA proyección del modelo WRF.

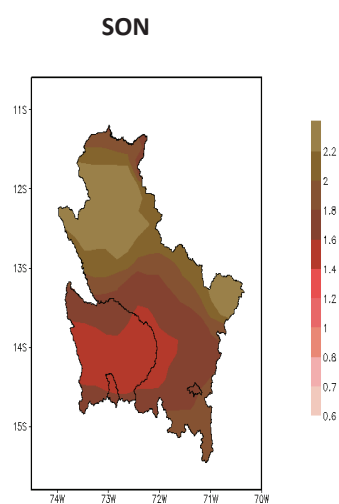


Figura 41 b: Cambios en la temperatura máxima del aire a escala regional (%) periodo 2050 relativo 1971-2000, periodo SON, proyección del modelo WRF.

4.5.3 Cambios en la temperatura mínima proyectada para el período 2050

La figura 42 (a y b) muestra los cambios en la temperatura mínima a nivel espacial en la escala anual y estacional para las regiones Cusco y Apurímac, simuladas por el modelo regional WRF.

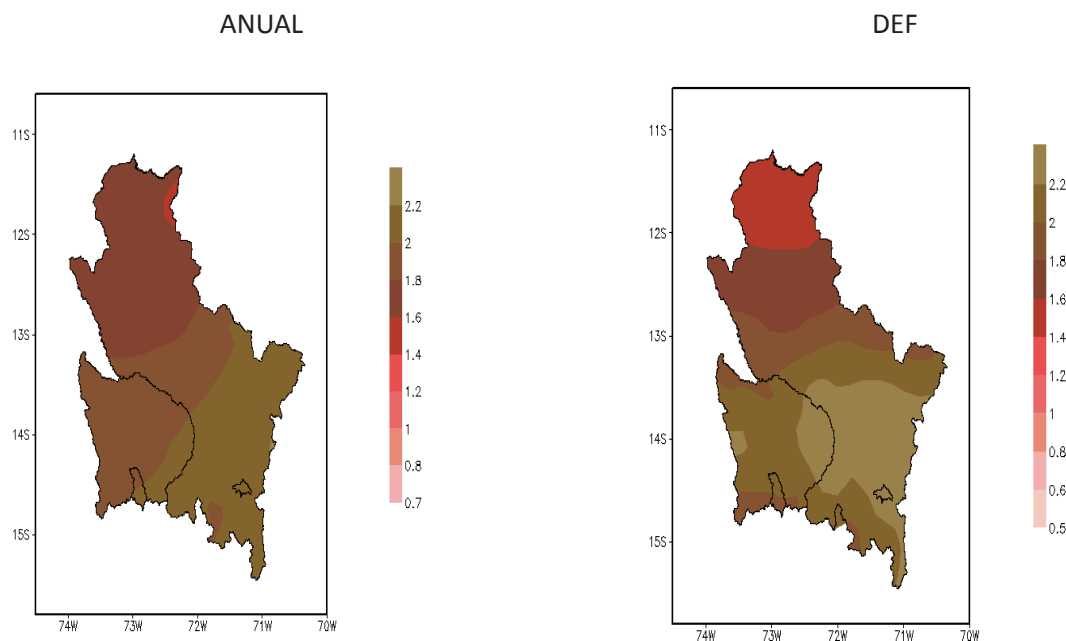
En términos generales, la temperatura mínima promedio anual experimentaría aumentos en las regiones de estudio, desde 1.4°C hasta 1.8°C en el extremo noroeste y hasta 2.2°C en el sur de la región Cusco. En la región Apurímac, los incrementos de temperatura comprenderían desde 1.6°C en la zona oeste llegando hasta 2.0°C en el extremo este.

En el trimestre DEF, la temperatura mínima muestra menores incrementos en relación a otras estaciones del año, desde 1.2°C en la zona centro de Cusco hasta 2°C en el extremo sureste de Cusco. En Apurímac, los menores incrementos de temperatura se observan en la zona norte y los mayores en el sur.

En el trimestre MAM las temperaturas mínimas son las que más incrementos muestran en relación a las temperaturas máximas y otras estaciones del año. Se observan valores entre 1.6 hasta 2.4°C. Estos incrementos ocurren principalmente en la zona este y sur este de la región Cusco, así como también en el extremo sureste de Apurímac. Estos cambios no necesariamente estarían asociados a la ocurrencia de precipitaciones podrían deberse aparentemente a la mayor presencia de cobertura nubosa y/o humedad atmosférica, entre otros.

En el trimestre JJA la temperatura mínima muestra los menores incrementos en relación a las otras estaciones del año, desde 1.2°C en la zona centro-norte de Cusco hasta 2°C en el extremo sureste de Cusco. En Apurímac, los menores incrementos de temperatura mínima se observan en la zona norte y los mayores en el sur.

En el trimestre SON, los incrementos de la temperatura van desde 1.6°C en el norte de Cusco hasta 2.4°C en la zona sur este de Cusco. En Apurímac, las temperaturas mínimas proyectan incrementos desde 1.6°C en la zona oeste hasta 2.0°C en la zona este de Apurímac.



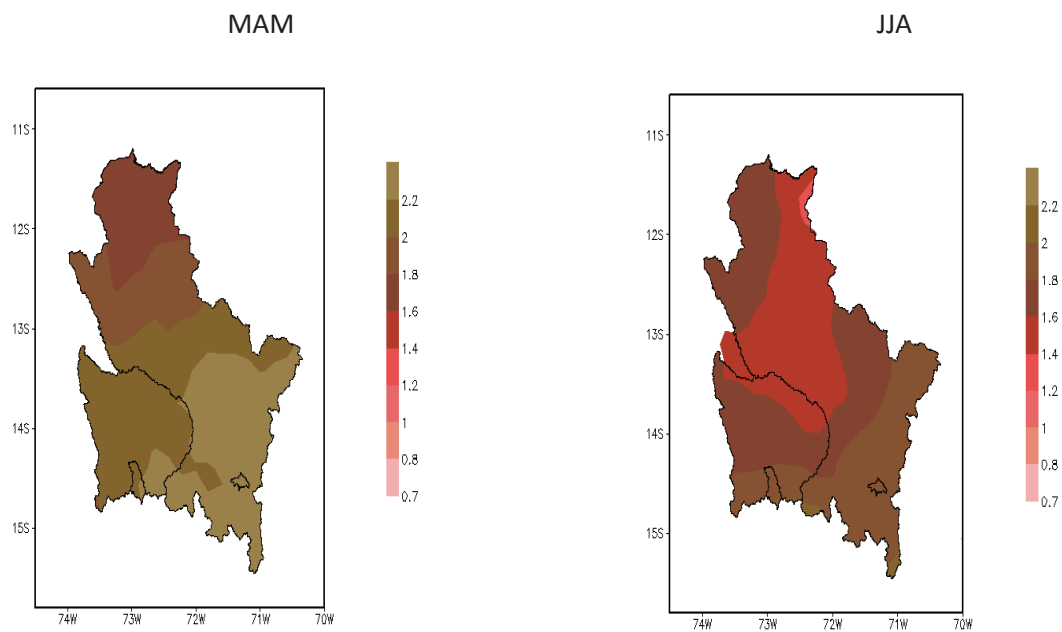


Figura 42 a: Cambios en la temperatura mínima del aire a escala regional (%) periodo anual, DEF, MAM, JJA proyección del modelo WRF.

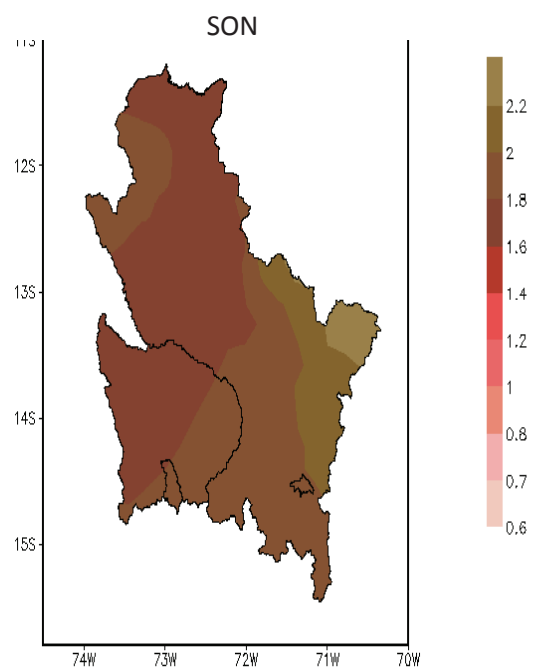


Figura 42 b: Cambios en la temperatura mínima del aire a escala regional (%) período 2050 relativo 1971-2000, período SON, proyección del modelo WRF.



V. CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio se centran en las proyecciones de los posibles cambios en el clima medio y la tendencia de los extremos de precipitación y temperatura del aire centrado en el año 2030, comprendido en el período 2016-2044, relativo al clima base 1971-2000, a escala regional y local en Cusco y Apurímac. También se incluyen las proyecciones del clima medio a escala regional centrado en el año 2050, comprendido en el período 2035-2064, siendo el escenario común a todos el A1B.

5.1 Clima medio a escala local 2030

Cambios en la precipitación

- La precipitación promedio anual en la localidad de Cay Cay tendrá un aumento significativo de 44%, en Curahuasi de 24% y Abancay de 21%. En tanto, en las localidades de Chalhuanca, Pisac, Urubamba, Granja Kcayra, Ccatcca, Sicuani, Acomayo se proyecta la precipitación dentro de la variabilidad normal actual de $\pm 15\%$.
- En el período de mayores precipitaciones (verano DEF), se proyecta un aumento de precipitación en 25% en la localidad de Cay Cay, 18% en Abancay y 16% en Curahuasi. En tanto se proyecta una ligera reducción de la precipitación de $\sim 5\%$ en Ccatcca, Pisac y Urubamba, que estarían dentro del rango relativo a su variabilidad normal actual.
- En el período de finalización de precipitaciones (otoño MAM), se proyectan aumentos de precipitación de 17% en Abancay, 30% en Curahuasi y 49% en Cay Cay, relativo al clima actual. En tanto, en Acomayo, Ccatcca, Granja Kcayra y Sicuani se proyectan dentro del umbral de la variabilidad normal actual de $\pm 15\%$.
- En el período de estiaje o seco (invierno JJA) se proyecta en promedio deficiencias de 22% en Sicuani y aumentos de 20% en Ccatcca. Estos cambios proyectados son poco significativos, ya que las precipitaciones climáticamente durante esta estación del año se presentan escasas.
- En el período de inicio de precipitaciones (primavera, SON), se proyecta aumentos en las localidades de Cay Cay en 42%, Ccatcca en 27%, Pisac en 33%, Curahuasi en 32% y Abancay en 30%.

Cambios en la temperatura máxima y mínima del aire

- Los mayores incrementos en la temperatura máxima del aire promedio anual de 1.0°C se proyecta en la localidad de Curahuasi, y menores aumentos de 0.7°C, en las localidades de Ccatcca y Chalhuanca. Mientras los mayores aumentos en la temperatura mínima del aire de 1°C se proyecta en la localidad de Acomayo, y los menores aumentos de 0.7°C, en las localidades de Abancay y Sicuani.
- En verano DEF, los mayores incrementos de 0.9°C en la temperatura máxima se proyecta en las localidades de Granja Kcayra y Curahuasi, y un menor aumento de 0.5°C en la localidad de Chalhuanca. También, en la temperatura mínima un mayor aumento de 1°C en las localidades de Urubamba y Acomayo, y menor aumento de 0.7°C en Curahuasi y Abancay.
- En otoño MAM, los mayores aumentos de 1°C en la temperatura máxima se proyecta en la localidad de Curahuasi y menor aumento de 0.7°C en la localidad de Abancay. Los mayores aumentos en la temperatura mínima de 1°C se proyectan en Urubamba y los menores aumentos de 0.6°C en la localidad de Sicuani.
- En invierno JJA, los mayores aumentos de 1°C en la temperatura máxima se proyecta en la localidad de Ccatcca y el menor aumento de 0.8°C en las localidades de Granja Kcayra y Chalhuanca. En tanto, los mayores aumentos en la temperatura mínima se proyectan en las localidades de Acomayo, Ccatcca y Granja Kcayra, mientras los menores aumentos de 0.6°C en la localidad de Abancay.
- En primavera SON, los mayores cambios en la temperatura máxima del aire de 0.9°C se proyectan en Urubamba y los menores cambios de 0.7°C en Abancay, Ccatcca, Chalhuanca y Granja Kcayra. Los mayores cambios en la temperatura mínima de 1°C se proyectan en Acomayo, Ccatcca y Granja Kcayra, y el menor valor de cambio de 0.7°C en Abancay.

5.2 Clima medio a escala regional 2030

Cambios en la precipitación 2030

- *La precipitación promedio anual y en los trimestres DEF y SON* en general estarían dentro del umbral de la variabilidad normal actual. Es decir, no se presentarían aumentos ni disminuciones mayores al 15%. Excepto en la provincia de Abancay, en Apurímac, y el extremo noroeste de la provincia de Quispicanchis, en Cusco; que alcanzarían valores entre 15 y 30% relativo al valor normal actual.
- *En el trimestre MAM* se proyecta incrementos hasta de 30% en las provincias de Abancay, Andahuaylas y Chincheros en Apurímac; y en la frontera de las provincias de Paucartambo, Calca, Cusco, Paruro, Quispicanchis en Cusco. Esta característica indica que el período de mayores lluvias presentaría un desfase abarcando parte del trimestre MAM.
- *En el trimestre JJA (periodo de estiaje)* se proyecta deficiencias en las provincias de Chincheros, Cotabambas, Grau y extremo sur de Abancay, en las cuales el déficit alcanzaría hasta 30%, y hasta 42%

en Antabamba y Andahuaylas, en Apurímac. En las provincias de Chumbivilcas, Espinar, Canas, Canchis el déficit alcanzaría entre 15 y 30% y llegando hasta 42% en Anta y Calca, en Cusco. En el clima actual las precipitaciones en este trimestre son escasas y las más bajas del año.

Cambios en la temperatura máxima del aire 2030

- Se proyecta incrementos en la temperatura máxima del aire *promedio anual* entre 0.7 y 1.2°C en todo el ámbito geográfico de Cusco y Apurímac, principalmente en las provincias de Antabamba, Cotabambas en Apurímac y las provincias de Chumbivilcas, Canas y Espinar en Cusco.
- *En el trimestre DEF*, los incrementos de temperatura máxima se proyectan entre 0.5°C, y hasta un 1.0°C en las provincias de Chumbivilcas, Espinar, Canas, Paucartambo, Calca, zona oeste de la Convención en Cusco y en las provincias de Chincheros, Grau, Cotabambas, Antabamba y zona este de Abancay, en Apurímac.
- *En el trimestre MAM*, las temperaturas se proyectan entre 0.7 y 1.2°C en el ámbito espacial de Cusco y Apurímac principalmente al sur de ambas regiones.
- *En el trimestre JJA*, se proyectan los mayores incrementos en la temperatura máxima hasta 1.6°C en las provincias del este de Apurímac (Antabamba, Cotabambas, Grau) y sur de Cusco (Chumbivilcas y Espinar).
- *En el trimestre SON*, los incrementos de temperatura llegarían hasta 1.4°C en la provincia La Convención en Cusco.

Cambios en la temperatura mínima del aire 2030

- *En el período anual y trimestre DEF*, se proyectan incrementos de la temperatura mínima hasta en 1.3°C en el extremo noroeste de la provincia La Convención en Cusco y en la provincia Antabamba, en Apurímac.
- *En el trimestre MAM*, se proyectan los mayores incrementos de temperatura hasta 1.5°C; principalmente en las provincias de La Convención, Cusco, Anta, en la región Cusco, y en las de Chincheros, Andahuaylas y Antabamba en la región Apurímac.
- *En el trimestre JJA*, la nueva característica termal de incremento hasta en 1.5°C indicaría heladas menos frecuentes; así como también podrían ser relevantes para los nevados de la cordillera del Vilcabamba, en Cusco, principalmente.
- *En el trimestre SON*, los incrementos de la temperatura llegarían hasta 1.4°C en la zona oeste de la provincia La Convención, Cusco y la provincia de Chincheros en Apurímac.
- La nueva característica termal de incrementos en la temperatura máxima del aire en los trimestres SON, DEF y MAM, en Cusco y Apurímac, podrían tener efectos relevantes sobre el rendimiento, calidad, y migración de cultivos a otros pisos altitudinales, en ambas zonas de estudio.

- Las temperaturas máximas del aire, en el trimestre JJA y las temperaturas mínimas en el trimestre MAM son las que más incrementos muestran (1.6 y 1.5°C, respectivamente), relativo al clima actual; y puede considerarse muy alto en relación a los cambios regionales o globales.

5.3 Extremos climáticos de precipitación y temperatura 2030

- La intensidad diaria de la precipitación anual (SDII) y los días muy lluviosos (R95p), en el futuro, mantendrían en parte los patrones observados actualmente, con la generalización de la tendencia de aumento en Pisac, Granja Kcayra, Cay Cay, Ccatcca en Cusco y en Curahuasi y Abancay en Apurímac. Excepto la localidad de Acomayo donde se proyecta una consistente disminución de ambos índices, comportamiento que podría estar influenciado en mayor medida por los efectos locales como orografía, urbanismo, cambios en el uso del suelo, cambios en la circulación local, entre otros.
- Existe alta incertidumbre en el comportamiento futuro de la frecuencia de días consecutivos secos (CDD), siendo la tendencia en el clima actual de reducción.
- La tendencia de los períodos lluviosos o días consecutivos húmedos (CWD) presenta de forma consistente un comportamiento regional de aumento en el 2030, pero sin significancia estadística.
- Se estima para el período 2030 los días y las noches tenderán a ser más cálidos, siendo significativo y de forma localizada en el período diurno; y regional en el periodo nocturno.
- La tendencia del número de días con noches frías (TN10p) en las localidades andinas de Curahuasi, Abancay y Chalhuanca (Apurímac) y Urubamba, Pisac, Granja Kcayra, Cay Cay, Ccatcca, Acomayo y Sicuani (Cusco), proyecta un comportamiento regional de disminución significativa en el 2030, indicando mayor frecuencia de noches cálidas (TN90p).
- Se estima una tendencia consistente de disminución significativa del índice número de heladas meteorológicas (FDO) en el período 2030, comportamiento que seguiría en parte, los patrones observados actualmente en las localidades andinas de Cusco (Granja Kcayra, Ccatcca, Acomayo y Sicuani). En tanto, en la localidad de Chalhuanca en Apurímac, no hay señal de tendencia en el futuro. Es decir que el número de heladas meteorológicas no mostraría cambios o posiblemente desaparecerían en el futuro, que es coherente con la tendencia regional y mundial de aumento de los valores mínimos de la temperatura mínima del aire y la disminución significativa de los días fríos en el futuro.
- Existe alta incertidumbre sobre la magnitud y sentido del rango diurno de temperatura en el futuro (DTR), es decir dada la proyección de calentamiento, podría darse el caso que la temperatura máxima sea mayor a la mínima o la temperatura mínima sea mayor a la máxima. Este comportamiento de aumento en las temperaturas, podría acentuar los deshielos de los glaciares, que en un primer momento ocasionarían el incremento de caudales y posterior disminución; lo que afectaría la agricultura bajo riego y la disponibilidad de agua para consumo humano, siendo los glaciares además de los ecosistemas de puna, la fuente principal de aseguramiento de la disponibilidad de agua para consumo en los meses

de estiaje.

- La tendencia de cambios en los extremos de temperaturas máxima y mínima del aire en el futuro podría ser relevante en el rendimiento de los cultivos de seguridad alimentaria (papa, trigo, cebada, habas y maíz) y de comercialización, en las regiones de estudio. Así como también con efectos en los pastizales y en el sector pecuario.

5.4 Clima medio a escala Regional 2050

Cambios en la precipitación

- En general se estima una tendencia de disminución de la precipitación promedio anual, en todas las estaciones del año, en la zona sur de las regiones Cusco y Apurímac; manifestándose en la estación de estiaje JJA con disminuciones importantes hasta de 75%, también en la estación de inicio de precipitaciones SON, donde las disminuciones alcanzarían valores de 45% relativo al clima actual, en gran parte del ámbito de las regiones Cusco y Apurímac; podrían estar asociados a cambios en la circulación atmosférica de gran escala y regional. Por otro lado, la disminución de las precipitaciones tendría efectos negativos en la agricultura, y acentuación de los conflictos de agua en el futuro.
- Se proyecta una tendencia de incremento importante de la precipitación alrededor de 60% en el trimestre MAM, principalmente en la zona centro de la región Cusco (cuenca media del río Vilcanota) y zona norte de la región Apurímac.

Cambios en la temperatura máxima del aire

- La temperatura máxima promedio anual tendría un aumento entre 1.4 y 2.2°C.
- El menor incremento de la temperatura máxima se proyecta para el periodo lluvioso (DEF), de aproximadamente de 1.2°C en la zona centro y norte de las regiones Cusco y Apurímac.
- El mayor incremento de la temperatura máxima se proyecta en la estación seca (JJA), de aproximadamente de 2.4°C en la zona noroeste y sur de la región Cusco y zona sur de la región Apurímac.

Cambios en la temperatura mínima del aire

- La temperatura mínima promedio anual, en el 2050, tendría un aumento entre 1.4 y 2.2°C, con mayor área de influencia en relación a la temperatura máxima.
- Los menores incrementos de la temperatura mínima se estima en la estación de seca (JJA) entre 1.2 y 1.4 °C en la zona centro-norte de Cusco y norte de Apurímac, respectivamente.
- Coincidente con los resultados de otros estudios, los mayores incrementos en temperaturas mínimas ocurrirán en el trimestre MAM, es decir hasta 2.4°C al sur de Cusco y Apurímac, principalmente en las provincias cusqueñas limítrofes con el altiplano de Puno.

RECOMENDACIONES

- Los escenarios del clima medio, así como los extremos de precipitación y temperatura presentados al 2030, constituyen un instrumento técnico de aproximación al clima futuro, que pueden ser utilizados para implementar estrategias de prevención, planeamiento y adaptación para enfrentar los posibles impactos del cambio climático en las regiones de Cusco y Apurímac. Estos resultados no indican su necesaria ocurrencia, sino la situación más probable, debido a que incorporan implícitamente la incertidumbre de los modelos globales (las asunciones del curso que tomarán los gases de efecto invernadero y aerosoles), además de la escasa información meteorológica (registros largos y continuos) en la Amazonía de Cusco y en los complejos paisajes montañosos de Apurímac.
- Los índices de extremos climáticos de temperatura y precipitación 2030, son el resultado de una primera aproximación donde se ha considerado como base la consistencia de dos modelos dinámicos TL959L60 (Modelo Japonés) y WRF (ejecutado en SENAMHI). A fin de continuar con los estudios se plantea una tercera fase que consiste en incorporar otros modelos del IPCC disponibles a escala diaria para que las proyecciones tengan una mayor confiabilidad.
- Los resultados presentados, podrán ser actualizados con los nuevos escenarios de emisión del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5, siglas en inglés) del Panel Intergubernamental de Cambio climático, y así como ser fundamentados con causas físicas asociadas a futuros cambios en el clima.
- Se recomienda construir infraestructuras que permita disponer de agua para los períodos deficitarios principalmente en el sur de las regiones de estudio, ya que los resultados de este estudio, demuestran que es muy probable la reducción de lluvias en el sur de las regiones Cusco y Apurímac en el periodo de estiaje (JJA) en el 2030, que se acentuarían y generalizarían en el 2050 en todos los trimestres del año, con reducciones importantes hasta de 75% en JJA y hasta de 45% en SON, relativo al clima actual.

REFERENCIAS

1. Bengtsson, L.; M. Botzet and M. Esch., 1996. Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? *Tellus*, 48A, 57–73.
2. Benestad, R., 2001. A Comparison between two empirical Downscaling Strategies. *Int. J. Climatol.*, 21: 1645-1668.
3. Benestad, R., Chen, D., Hansse-Bauer, I., 2007. Empirical Statistical Downscaling. p 272.
4. Blazquez J., 2007. Validación regional del modelo WRF, bajo condiciones meteorológicas persistentes. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires.
5. Brunet, M., Casado, J., De Castro M., Galán P., López, J., Martín J., Pastor, A., Petisco, E., Ramos, P., Ribalaygua, J., Rodríguez, E., Sanz, I., Torres, L. ., 2009. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España, INM.
6. Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A. and Celleri, R. 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling: implications for water resources management. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 7,1821–1848,2010.
En línea: www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/7/1821/2010/
7. CMAP, 2011. En línea: CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP).
8. Eslinger, D.L., O'Brien, J.J., Iverson, R.L., 1989. Empirical Orthogonal Function analysis of cloud-containing coastal zone color scanner images of northeastern North American coastal waters. *J. Geophys. Res.*, 94: 10,884 – 10,890.
9. FAO, 2011. Cambio climático y seguridad Alimentaria en línea: <http://www.fao.org/climatechange/49376/es/>
10. Frich P, Alexander L, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein A, y Peterson T, 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, 19, 193-212.
11. Habata S, Umezawa K, Yokokawa M, Kitawaki S., 2004. Hardware system of the Earth Simulator. *Parallel Comput* 30:1287–1313.
doi:10.1016/j.parco.2004.09.004.
12. Hulme, M., Jenkins, G.J., Lu, X., Turnpenny, J.R., Mitchell, T.D., Jones, R.G., Lowe, J., Murphy, J.M., Hassell, D., Boorman, P., McDonald, R. and Hill, S. 2002. Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report, Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK. 120pp.
13. Hulme, M. y Lu X., 2000. How to factor interannual climate variability into Climate Scenarios. A note prepared for the DETR Fast-Track Impacts Group.
14. IPCC, 2001 a, b. Tercer Informe de Evaluación. Climate Change 2001: The Scientific Basis. J. T. Houghton et al. Eds. Cambridge University Press, UK, 881 pp.
15. Jácome G., 2011. Informe de Validación del modelo Japonés TL959L60 (por publicar).
16. Kim et al., 2008. The Global Monsoon Variability Simulated by CMIP3 Coupled Climate Models. doi: 10.1175/2008JCLI2041.1. School of Ocean and Earth Science and Technology Publication 7517 and International Pacific Research Center Publication Number 542.
17. Lambert SJ, Boer GJ (2001) CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Clim Dyn* 17:83–106.

18. Lenderink G, Buishand A, van Dursen, W., 2006. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*
19. Nakicenovic N y Swart R., 2000. Emissions Scenarios. 2000, Special Report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
20. Marengo, J., 2006. Cambios Climaticos Globales y sus efectos sobre la Biodiversidad. Caracterizacion del Clima Actual y definicion de las alteraciones climaticas para el territorio brasileño a lo largo del siglo XXI, 163 pp.
21. Mizuta, R. et al., 2006. "20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model –mean climate states–". *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 165-185.
22. Moise AF, Colman RA, Zhang H (2005) Coupled model simulations of current Australian surface climate and its changes under greenhouse warming: an analysis of 18 CMIP2 models. *Aust Meteorol Mag* 54:291–307.
23. Rayner NA, Parker DE, Horton EB, Folland CK, Alexander LV, Rowell DP, Kent EC, Kaplan A., 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res* 108. doi:10.1029/2002JD002670.
24. Salzmann, N., Frei, C., Vidale, P., Hoelzle, M., 2007. The application of Regional Climate Model output for the simulation of high-mountain permafrost scenarios. *Global and planetary Change* 56 (2007) 188-202.
25. Salzmann, N., Notzli, J., Hauck, C., Gruber, S. Hoelzle, M. Haeberli, W., 2007. Ground surface temperature scenarios in complex high-mountain topography based on regional climate model results. *J Geophys Res* VOL. 112, F002S12 doi:10.1029/2006JF000527,2007.
26. Sánchez, T., 2011. Informe Técnico N° 1. Interpolación y digitalización de mapas de Caracterización Climática, Escenarios de Cambio climático y eventos extremos climáticos.
27. SENAMHI, 2007. Escenarios de cambio climático en la Cuenca del Río Urubamba para el año 2100, 124 pp.
28. SENAMHI, 2009. Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030.
29. Tebaldi C, Knutti, R. 2007. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil Trans R Soc A* 365:2053–2075
30. Urrutia, R., Vuille, M., 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, XXXXXX, doi: 10.1029/2008JD011021, 2009.
31. Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L.O., 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from Statistical Downscaling methods. Data Distribution Centre of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

8.1 Escenarios de precipitación y temperatura proyectada para el período 2030

8.1.1 Mapas de escenarios de precipitación 2030

Mapa N° 01: Escenario de Precipitación anual (mm) periodo 2030

Mapa N° 02: Escenario de Precipitación dic-ene-feb (mm) periodo 2030

Mapa N° 03: Escenario de Precipitación mar-abr-may (mm) periodo 2030

Mapa N° 04: Escenario de Precipitación jun-jul-ago (mm) periodo 2030

Mapa N° 05: Escenario de Precipitación set-oct-nov (mm) periodo 2030

8.1.2. Mapas de cambios en la precipitación 2030

Mapa N° 06: Cambios en la Precipitación anual (mm) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 07: Cambios en la Precipitación dic-ene-feb (mm) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 08: Cambios en la Precipitación mar-abr-may (mm) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 09: Cambios en la Precipitación jun-jul-ago (mm) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 10: Cambios en la Precipitación set-oct-nov (mm) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

8.1.3. Mapas de escenarios de temperatura máxima 2030

Mapa N° 11: Escenario de Temperatura máxima anual (°C) periodo 2030

Mapa N° 12: Escenario de Temperatura máxima dic-ene-feb (°C) para el periodo 2030

Mapa N° 13: Escenario de Temperatura máxima mar-abr-may (°C) para el periodo 2030

Mapa N° 14: Escenario de Temperatura máxima jun-jul-ago (°C) para el periodo 2030

Mapa N° 15: Escenario de Temperatura máxima set-oct-nov (°C) para el periodo 2030

8.1.4. Mapas de cambios en la temperatura máxima 2030

Mapa N° 16: Cambios en la temperatura máxima anual (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 17: Cambios en la temperatura máxima dic-ene-feb (°C) para el periodo 2030 con referencia



al periodo base 1971-2000

Mapa N° 18: Cambios en la temperatura máxima mar-abr-may (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 19: Cambios en la temperatura máxima jun-jul-ago (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 20: Cambios en la temperatura máxima set-oct-nov (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

8.1.5. Mapas de escenarios de temperatura mínima 2030

Mapa N° 21: Escenario de Temperatura mínima anual (°C) periodo 2030

Mapa N° 22: Escenario de Temperatura mínima dic-ene-feb (°C) para el periodo 2030

Mapa N° 23: Escenario de Temperatura mínima mar-abr-may (°C) para el periodo 2030

Mapa N° 24: Escenario de Temperatura mínima jun-jul-ago (°C) para el periodo 2030

Mapa N° 25: Escenario de Temperatura mínima set-oct-nov (°C) para el periodo 2030

8.1.6. Mapas de cambios en la temperatura mínima 2030

Mapa N° 26: Cambios en la temperatura mínima anual (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 27: Cambios en la temperatura mínima dic-ene-feb (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 28: Cambios en la temperatura mínima mar-abr-may (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 29: Cambios en la temperatura mínima jun-jul-ago (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

Mapa N° 30: Cambios en la temperatura mínima set-oct-nov (°C) para el periodo 2030 con referencia al periodo base 1971-2000

8.2 Base matemática de las técnicas Aplicadas

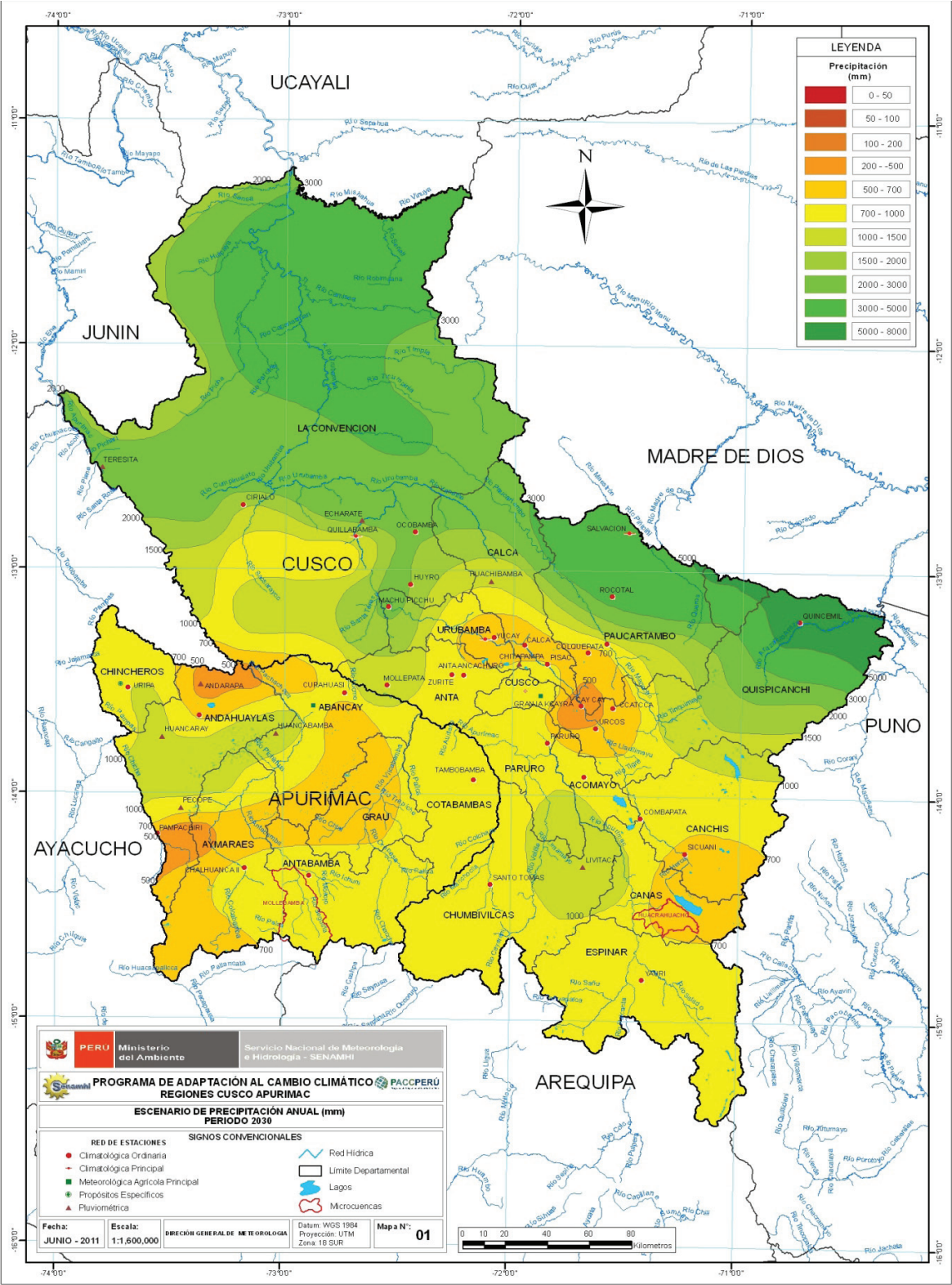
8.2.1 Downscaling Dinámico

8.2.2 Downscaling y Funciones Empíricas Ortogonales

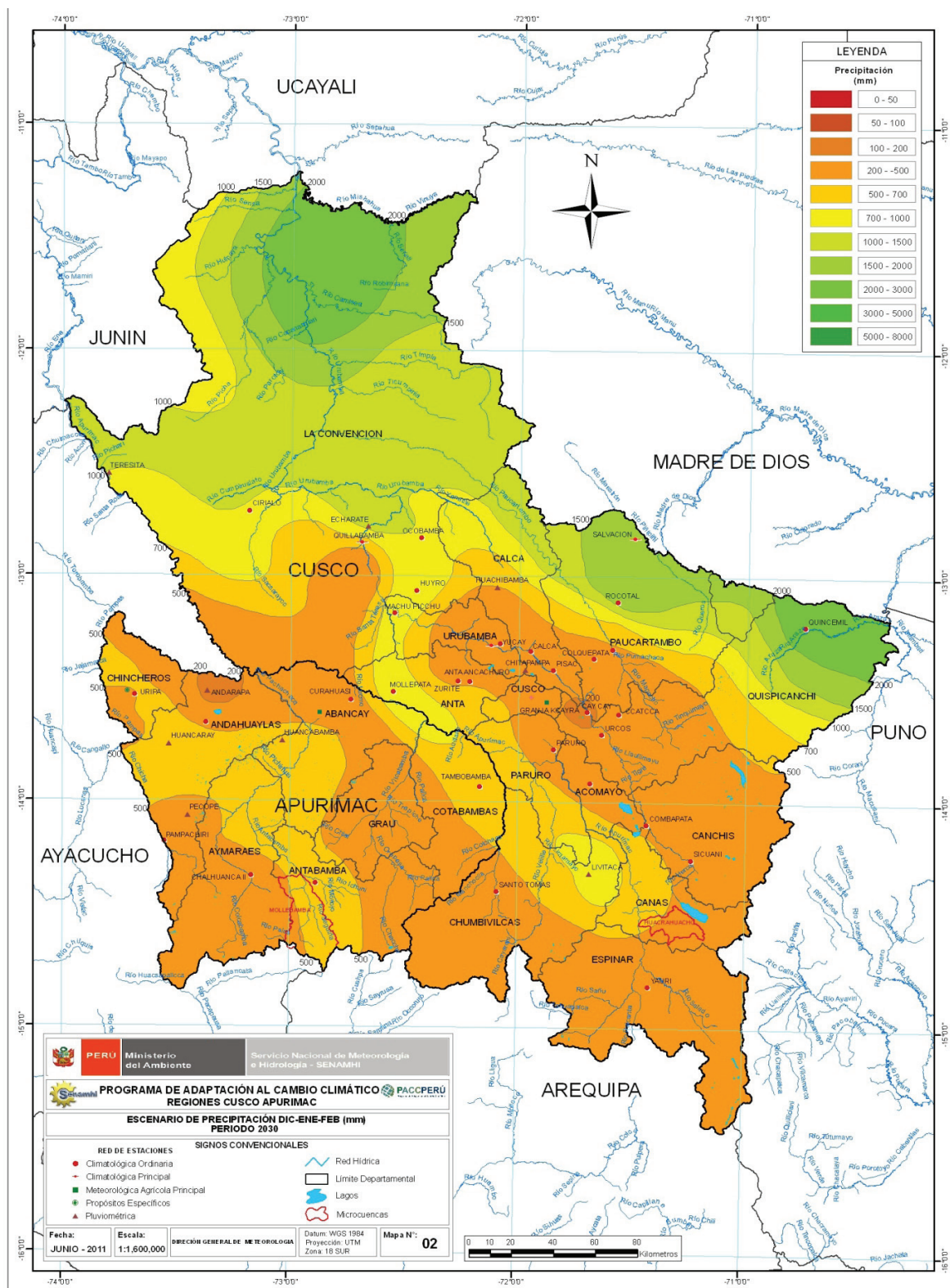
8.2.3 Base matemática de la interpolación para regrillado de la información de los AOGCMs.

8.3 Acrónimos

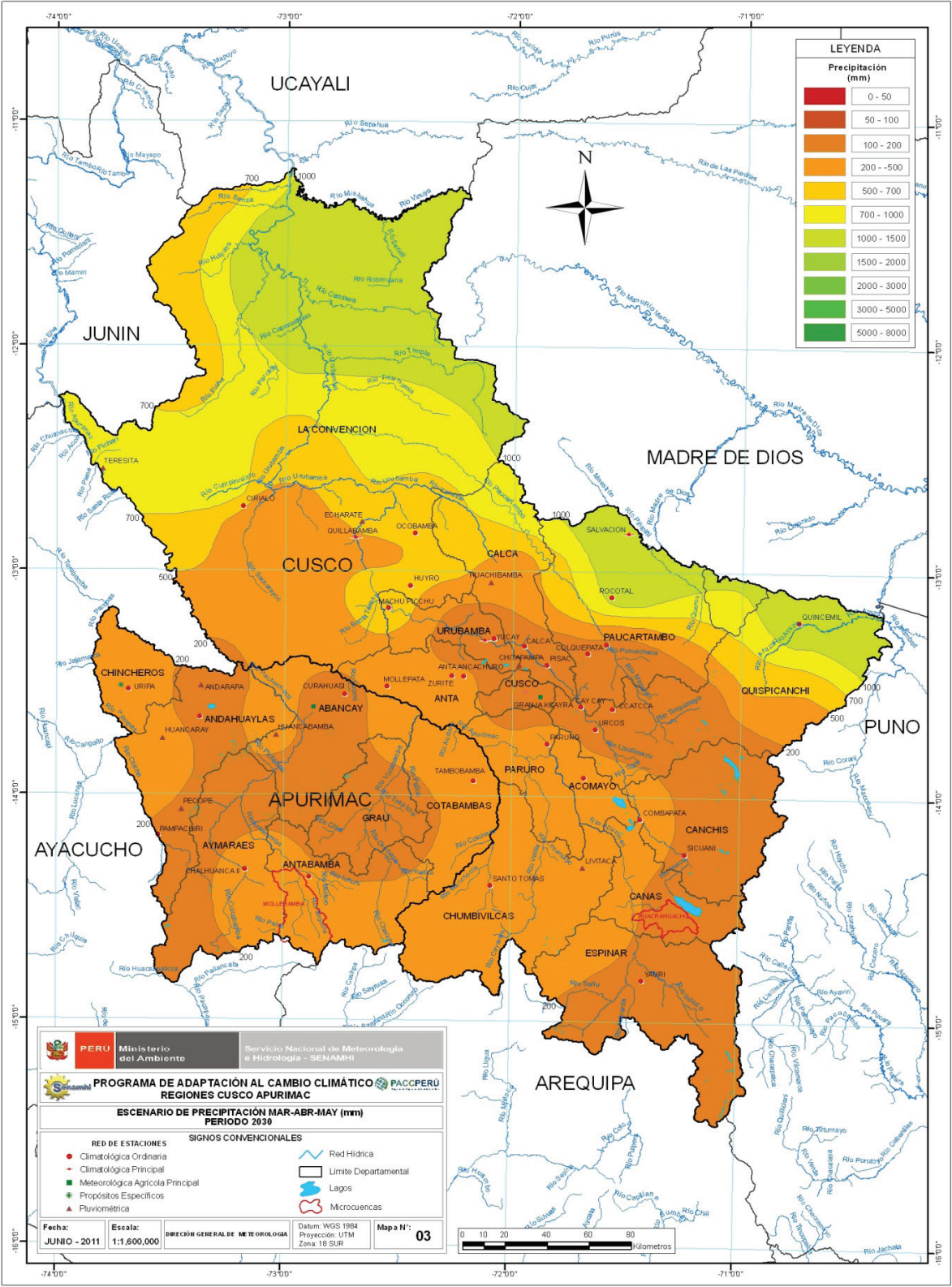
MAPAS DE ESCENARIOS DE PRECIPITACION
PERIODO 2030
(2016-2044)



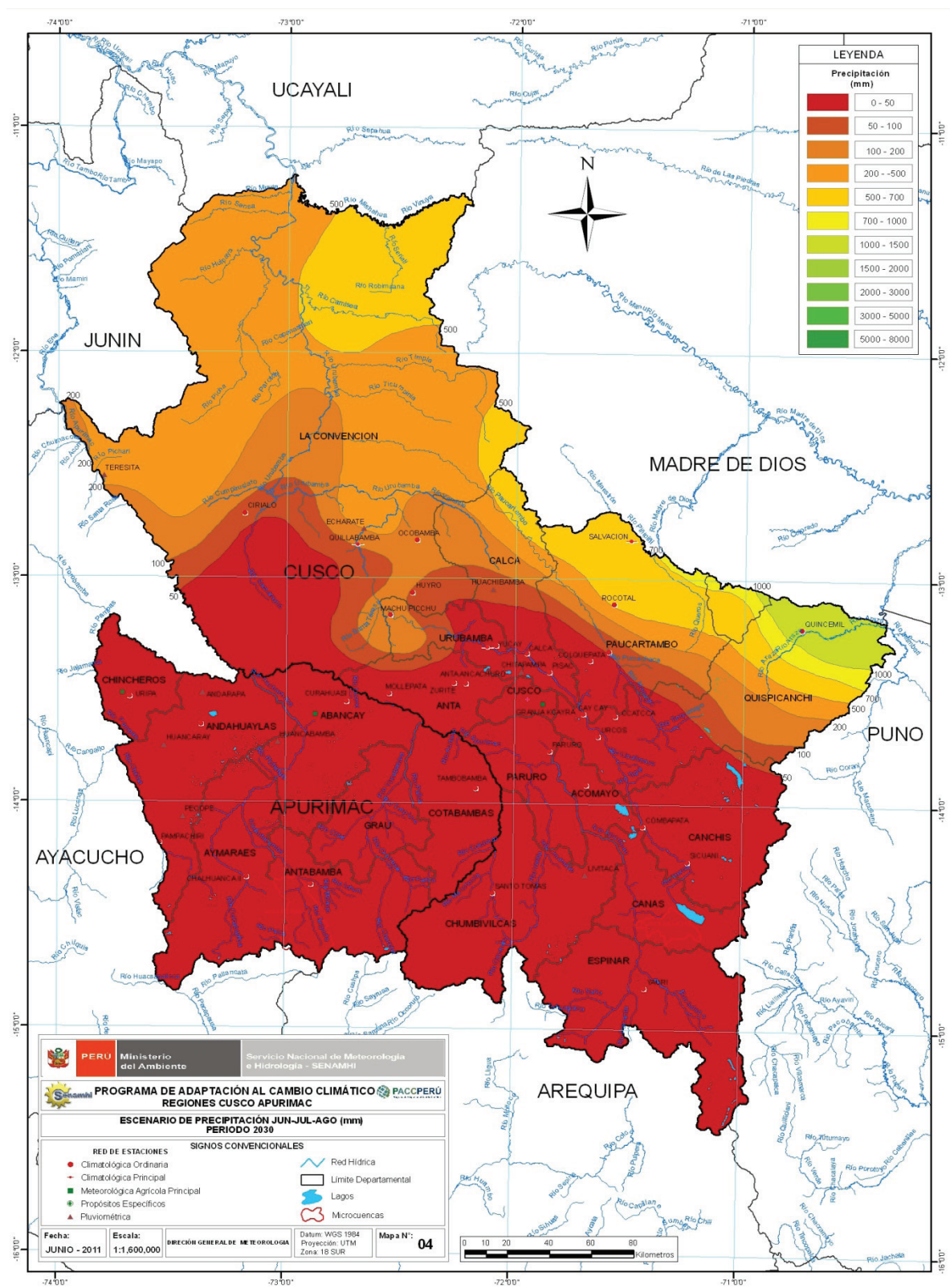
Mapa N° 01: Escenario de Precipitación anual (mm) período 2030



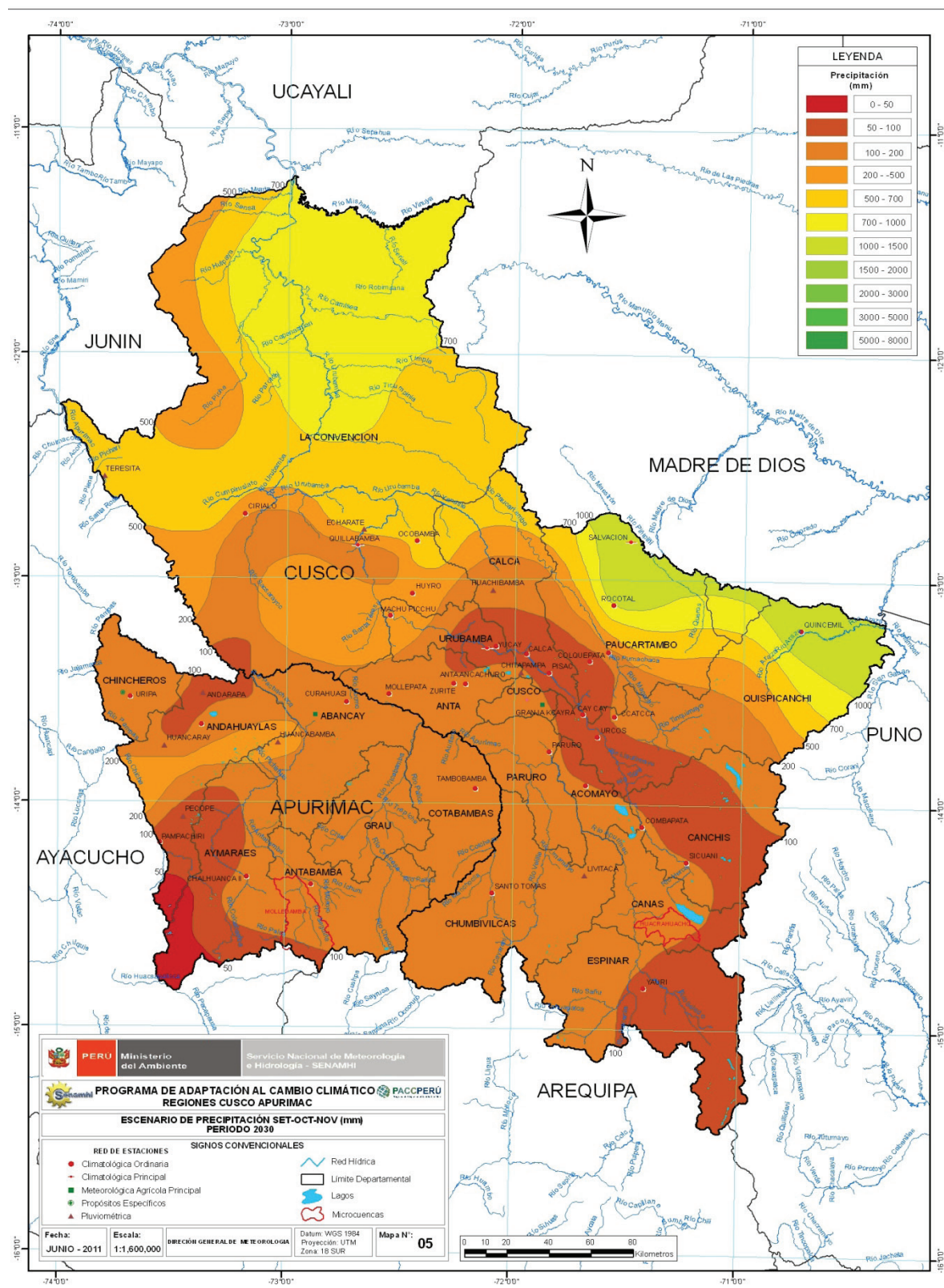
Mapa N° 02: Escenario de Precipitación dic-ene-feb (mm) período 2030



Mapa N° 03: Escenario de Precipitación mar-abr-may (mm) período 2030

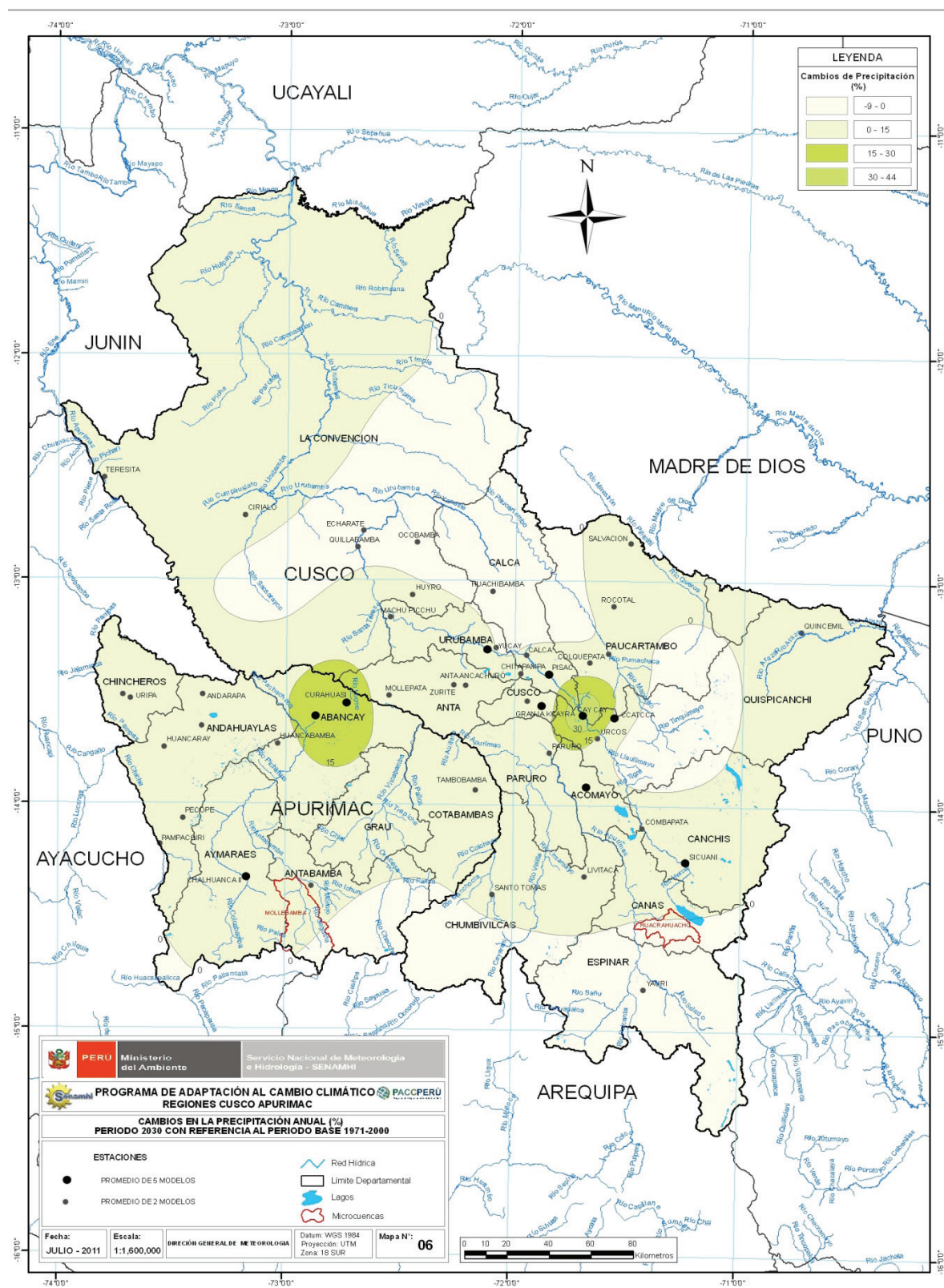


Mapa N° 04: Escenario de Precipitación jun-jul-ago (mm) período 2030

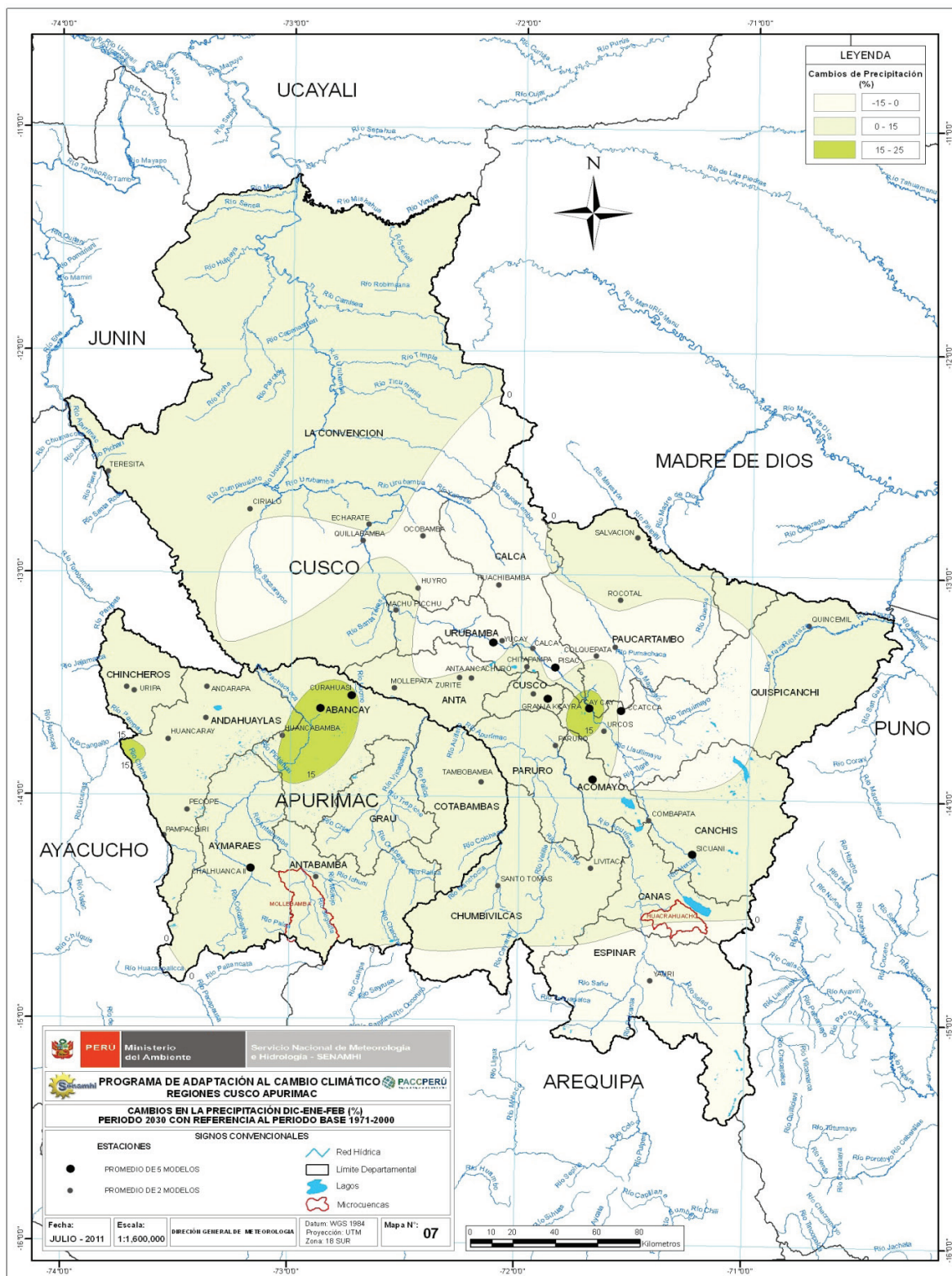


Mapa N° 05: Escenario de Precipitación set-oct-nov (mm) período 2030

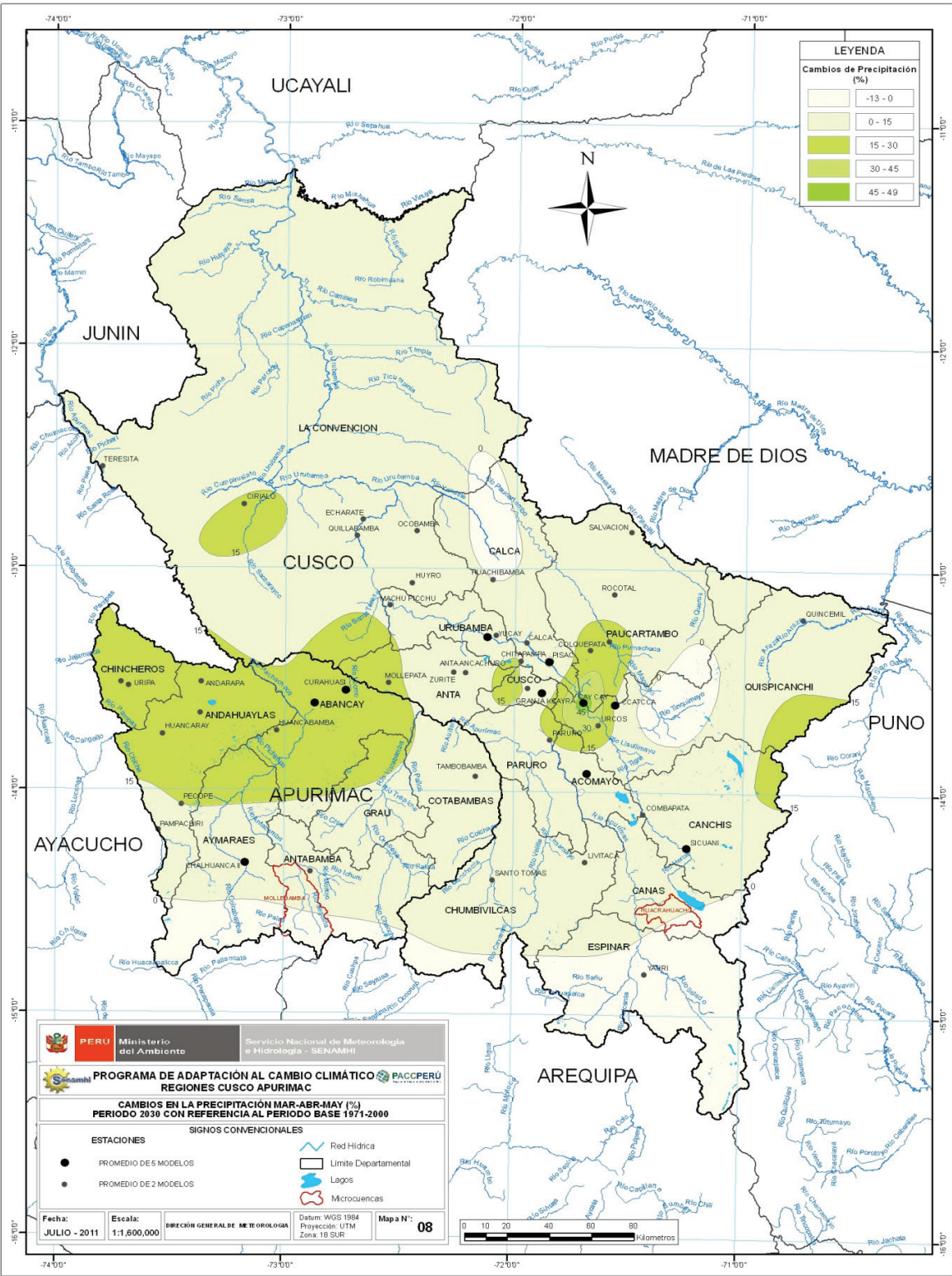
MAPAS DE CAMBIOS EN LA PRECIPITACION
PERIODO 2030
(2016-2044)



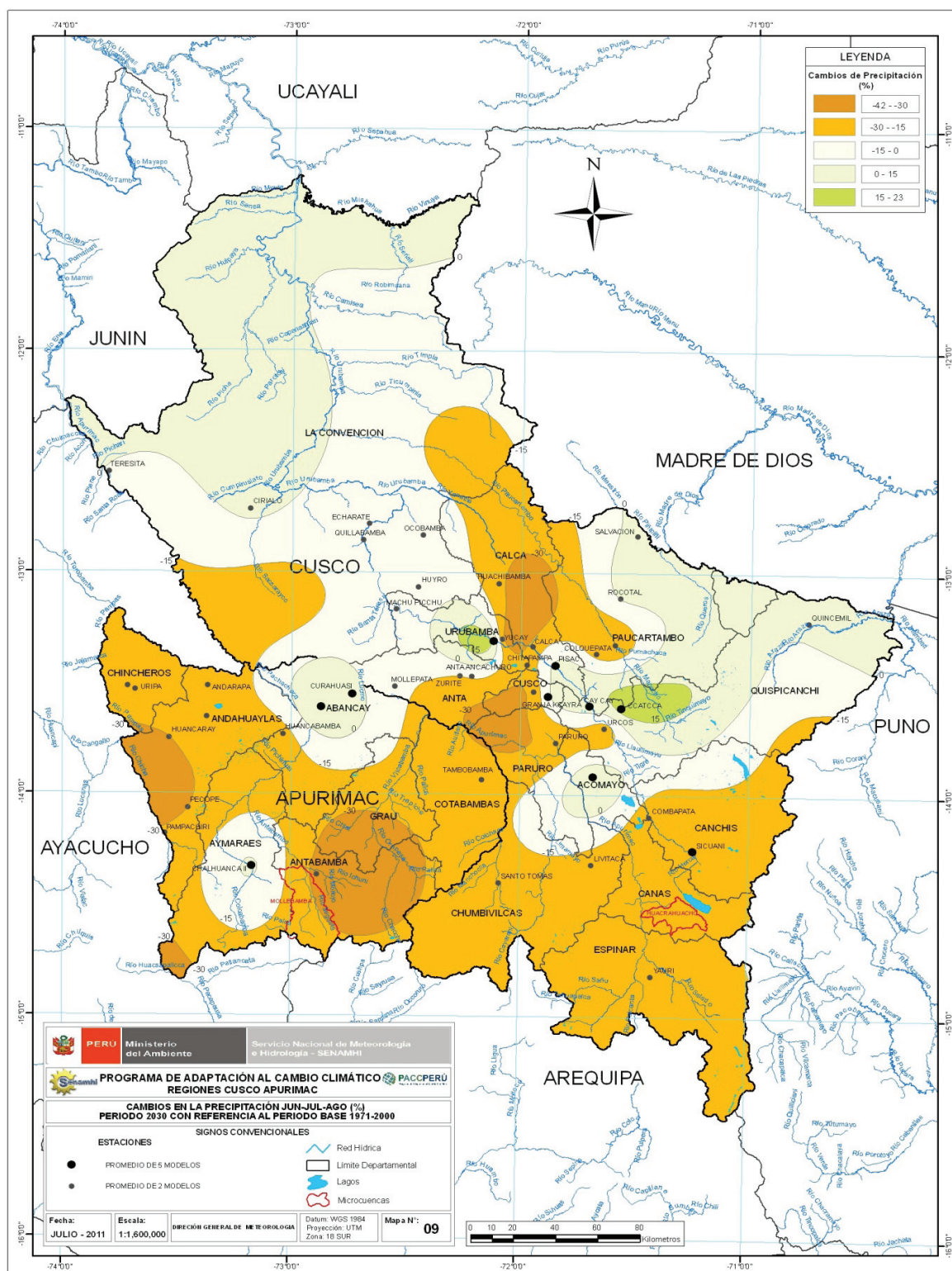
Mapa N° 06: Cambios en la Precipitación anual (%) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



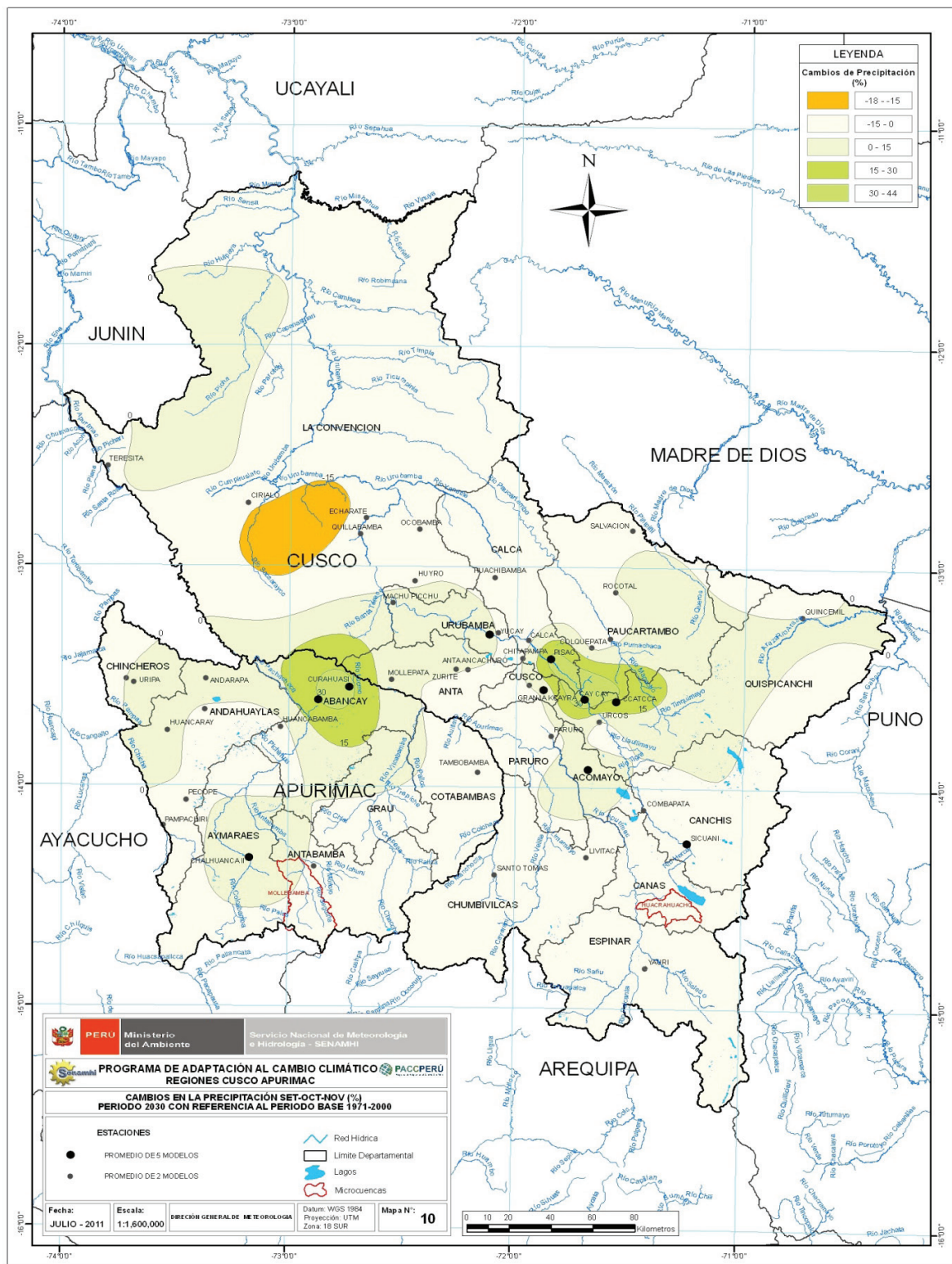
Mapa N° 07: Cambios en la Precipitación dic-ene-feb (%) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



Mapa N° 08: Cambios en la Precipitación mar-abr-may (%) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

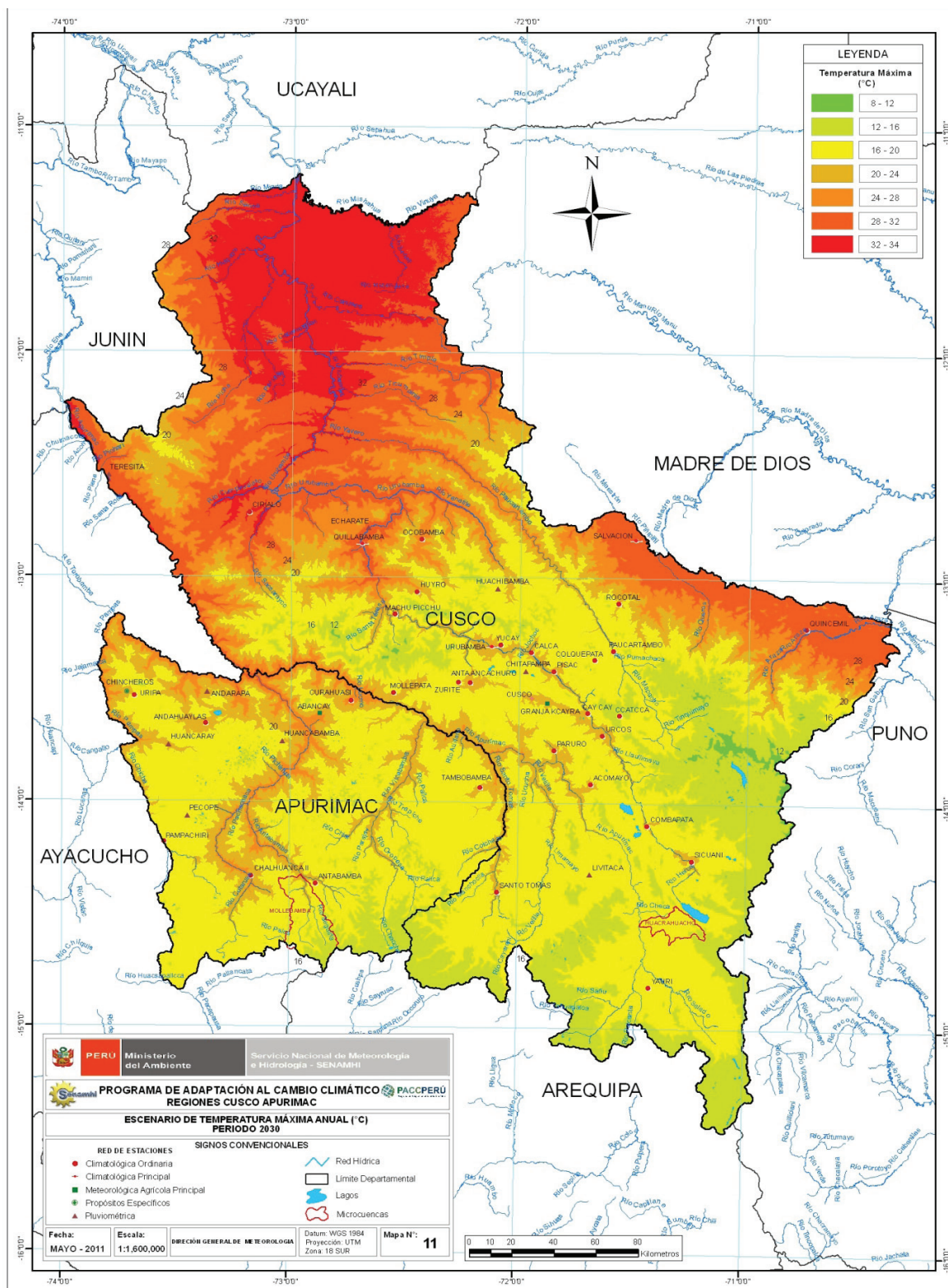


Mapa N° 09: Cambios en la Precipitación jun-jul-ago (%) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

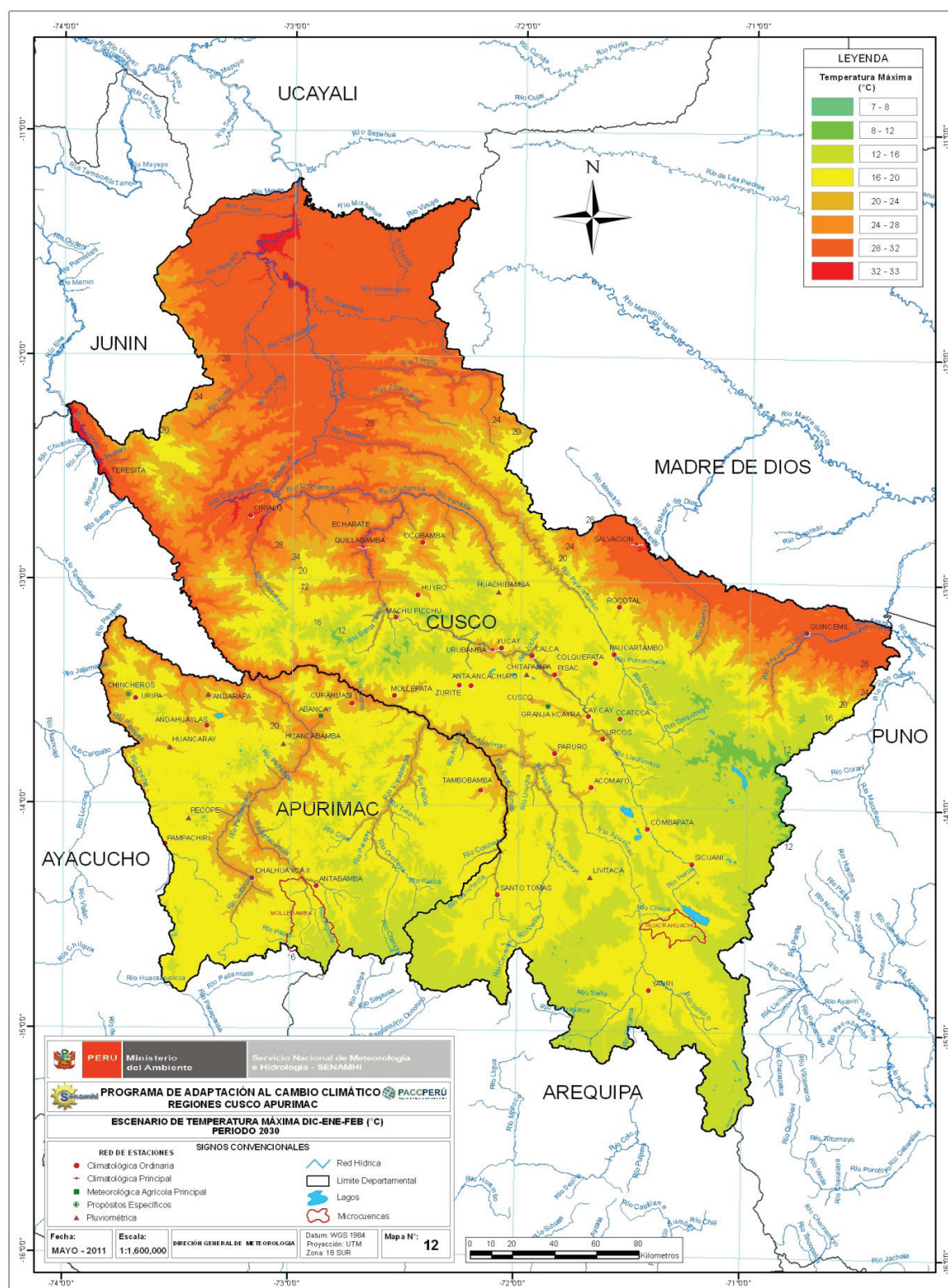


Mapa N° 10: Cambios en la Precipitación set-oct-nov (%) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

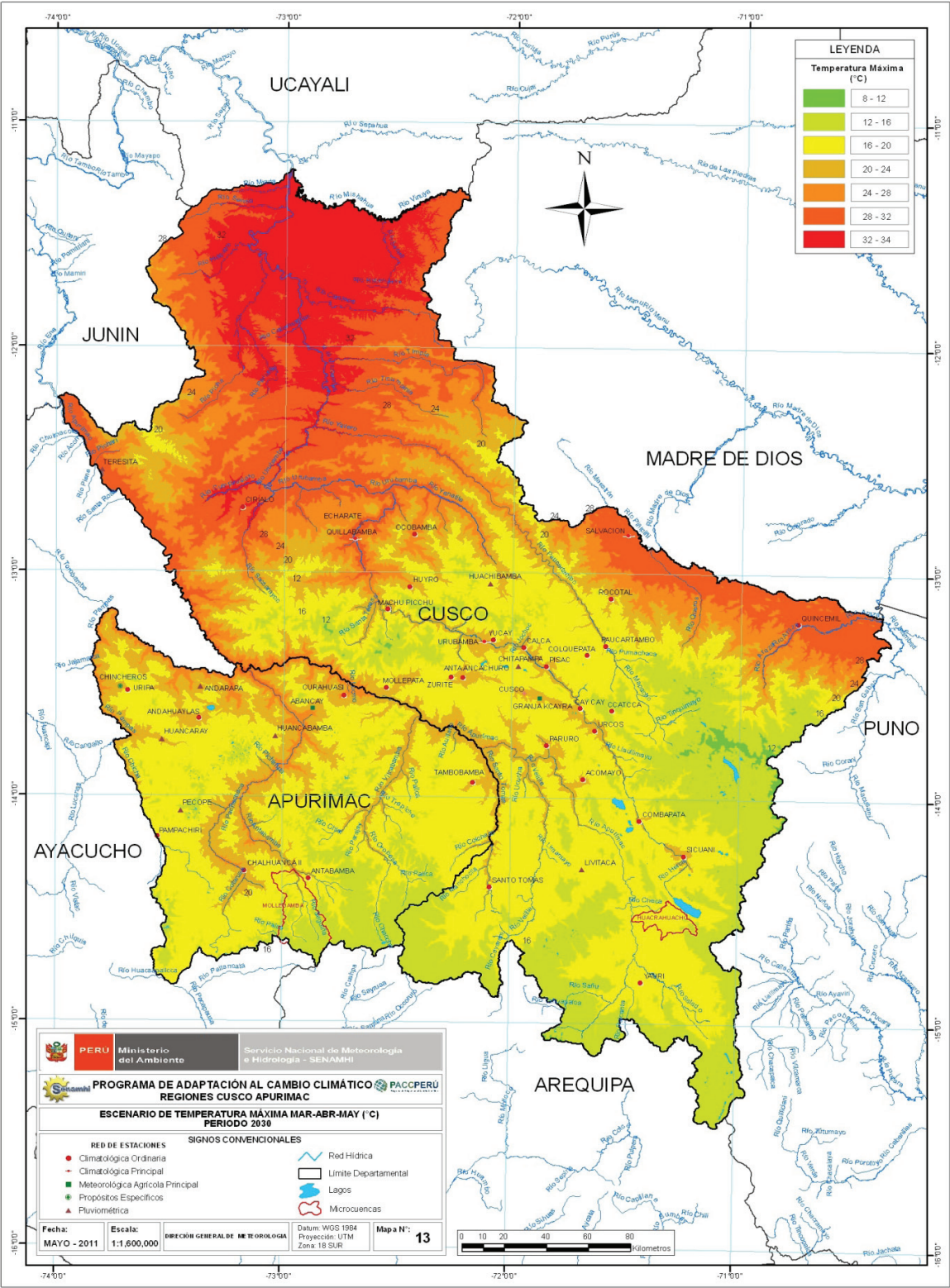
MAPAS DE ESCENARIOS DE TEMPERATURA MAXIMA
PERIODO 2030
(2016-2044)



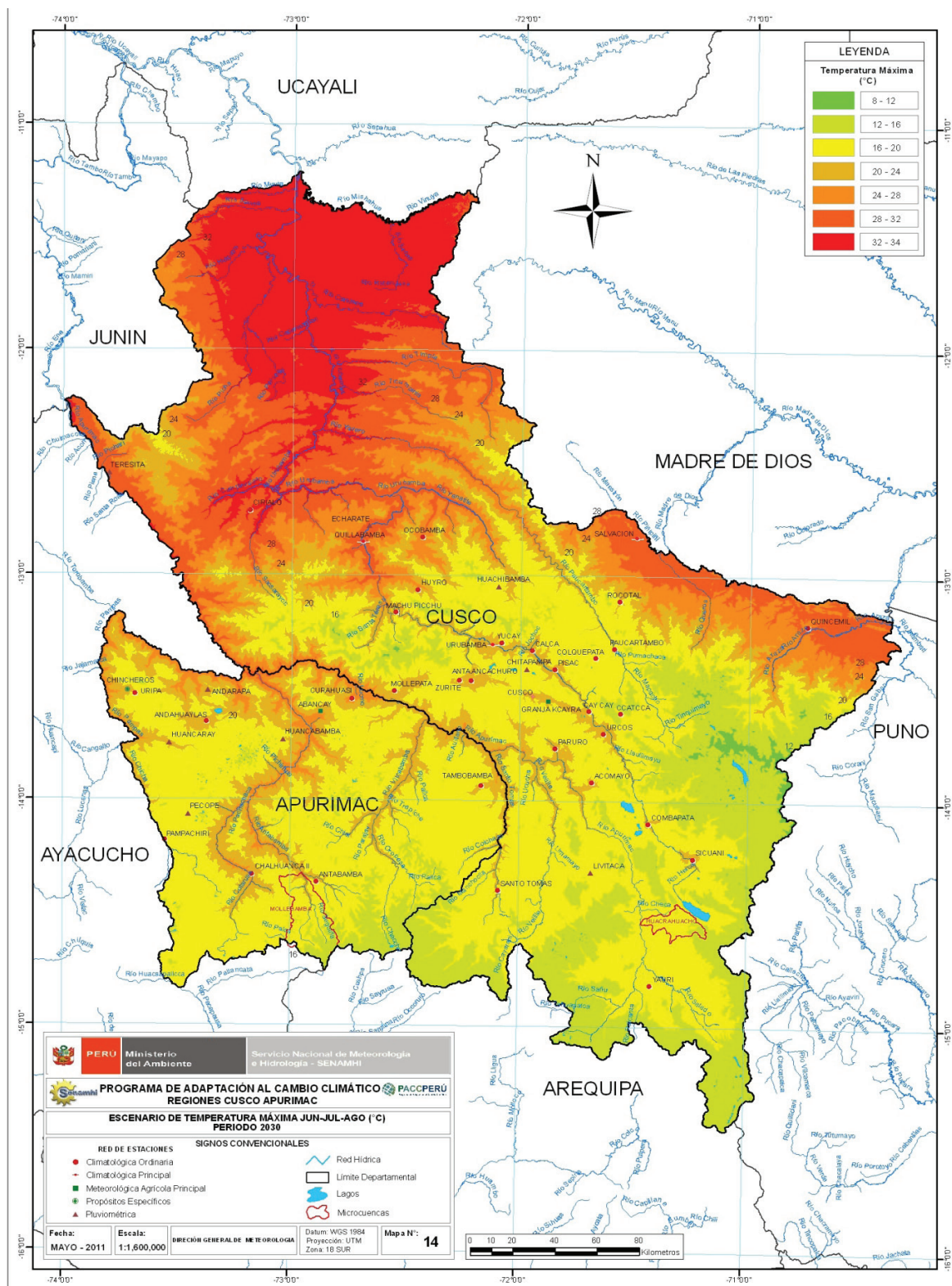
Mapa N° 11: Escenario de Temperatura máxima anual (°C) período 2030



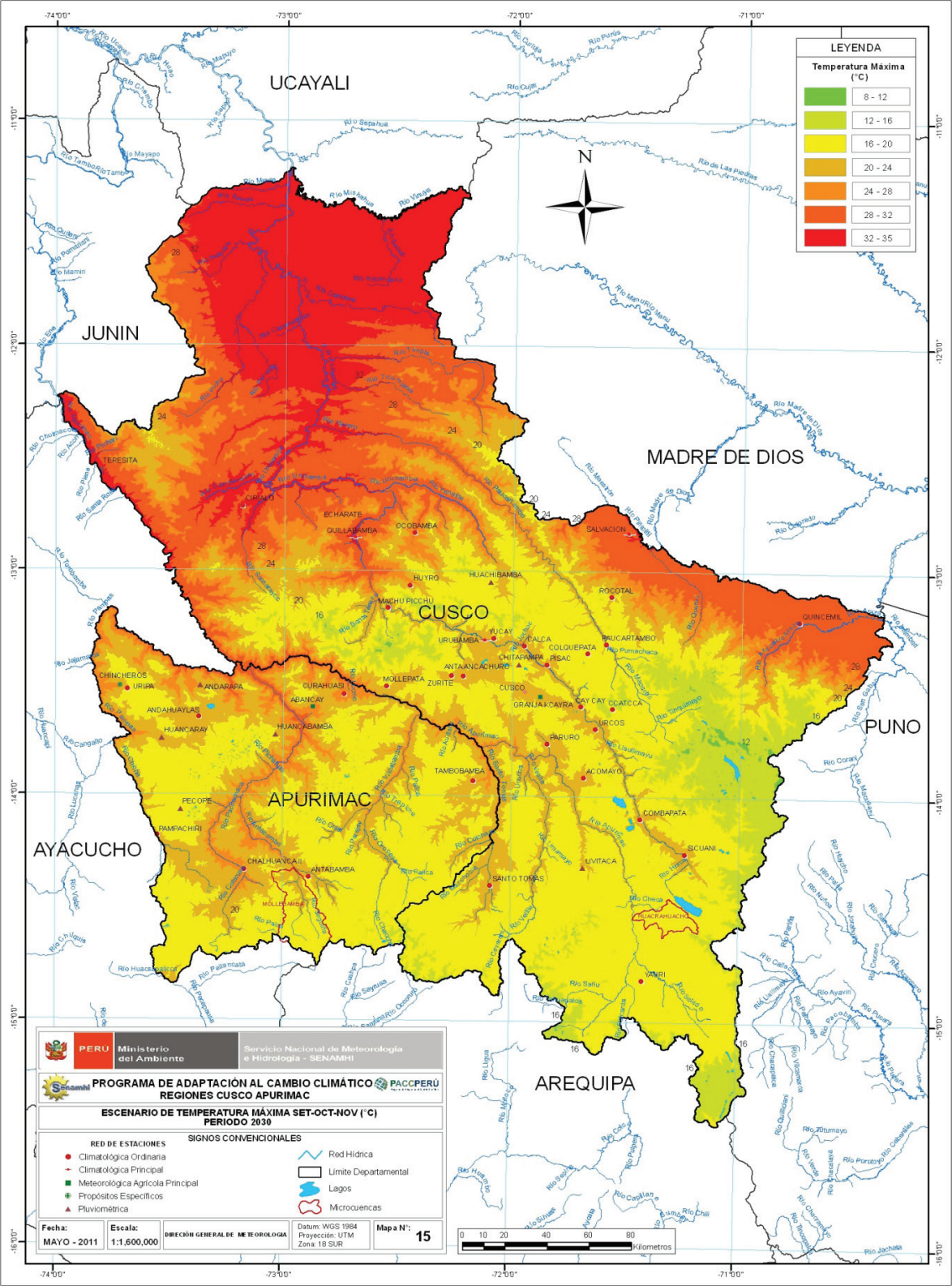
Mapa N° 12: Escenario de Temperatura máxima dic-ene-feb (°C) período 2030



Mapa N° 13: Escenario de Temperatura máxima mar-abr-may (°C) período 2030

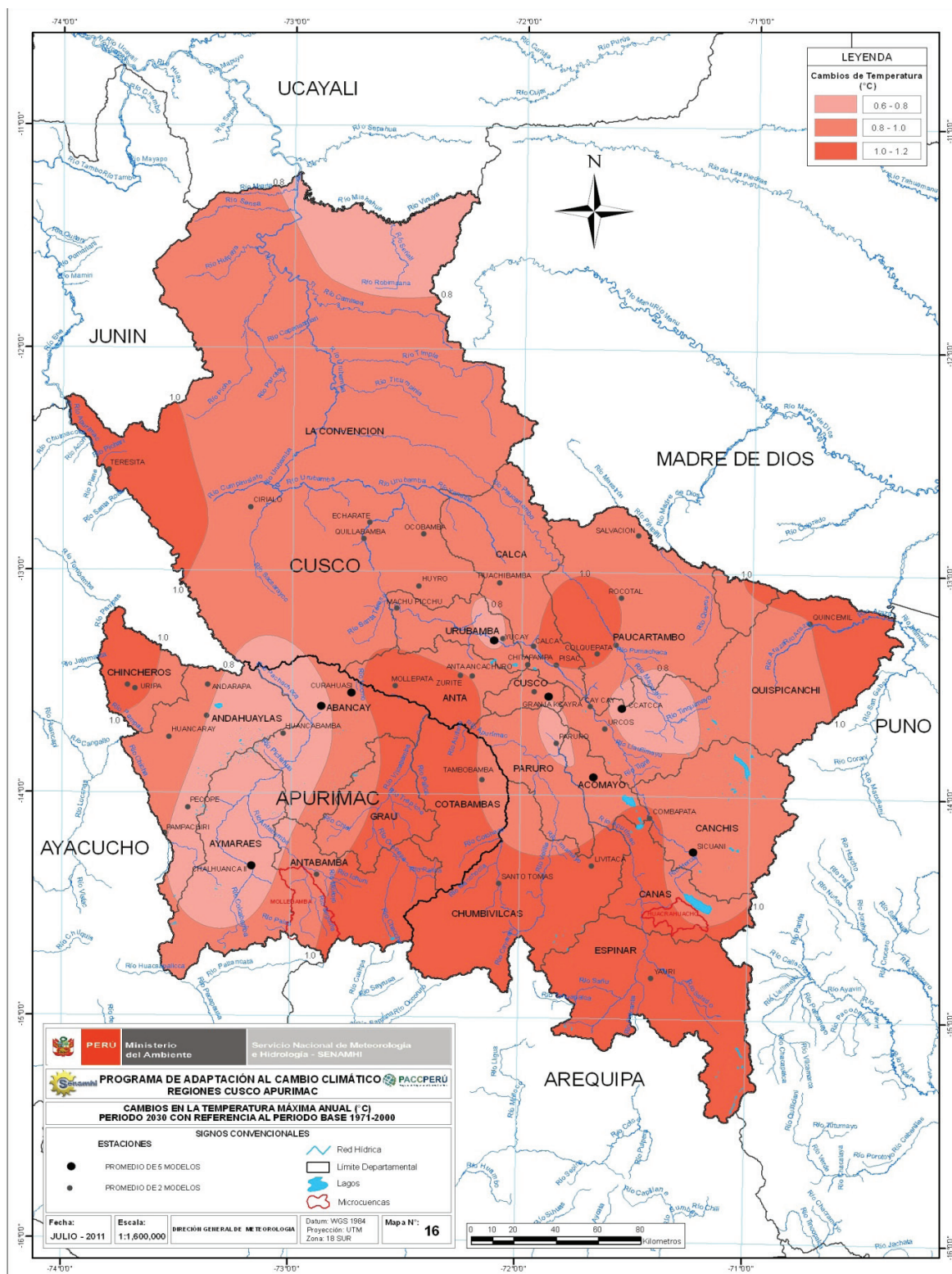


Mapa N° 14: Escenario de Temperatura máxima jun-jul-ago (°C) período 2030

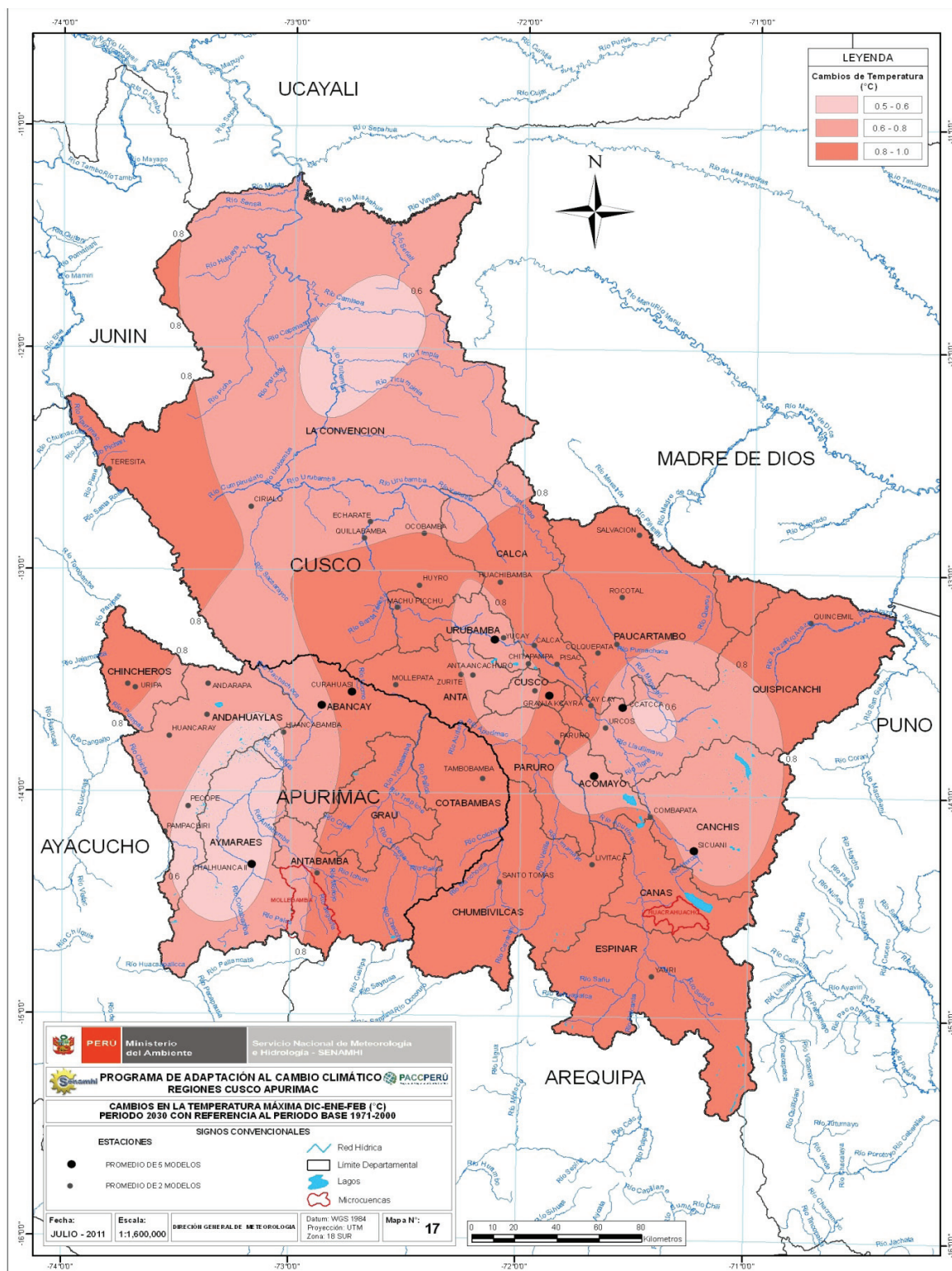


Mapa N° 15: Escenario de Temperatura máxima set-oct-nov (°C) período 2030

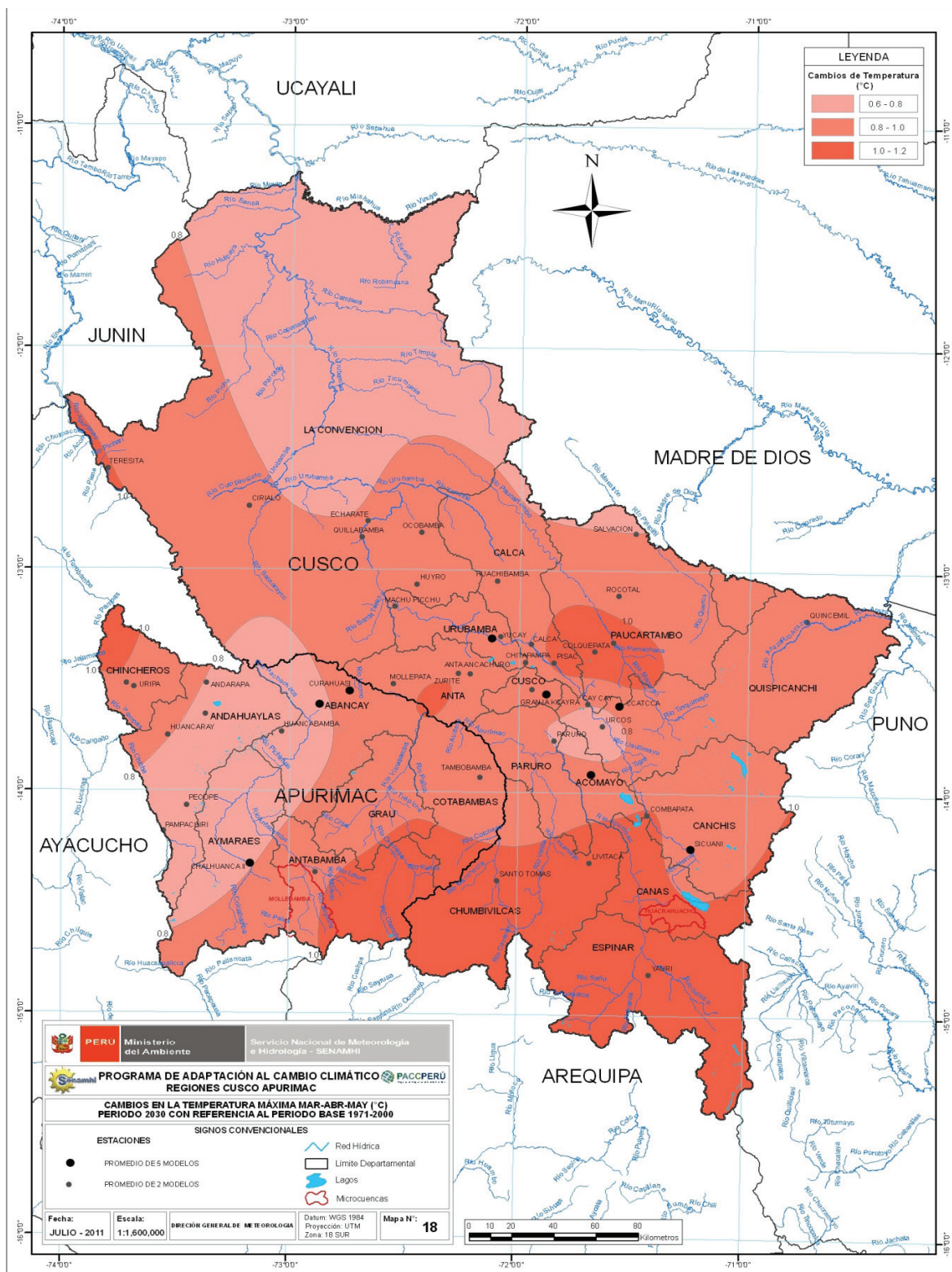
MAPAS DE CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MAXIMA
PERIODO 2030
(2016-2044)



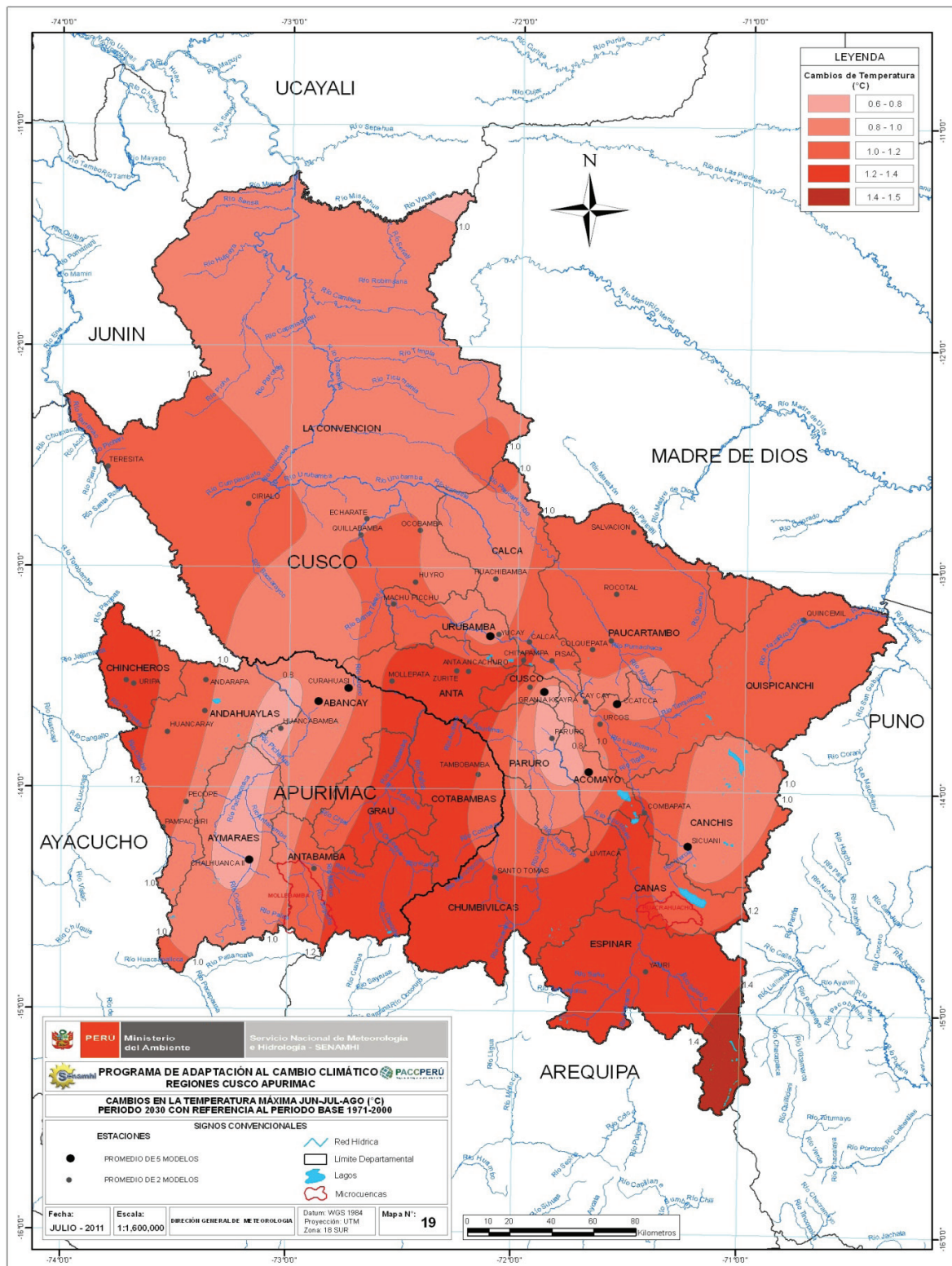
Mapa N° 16: Cambios en la temperatura máxima anual (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



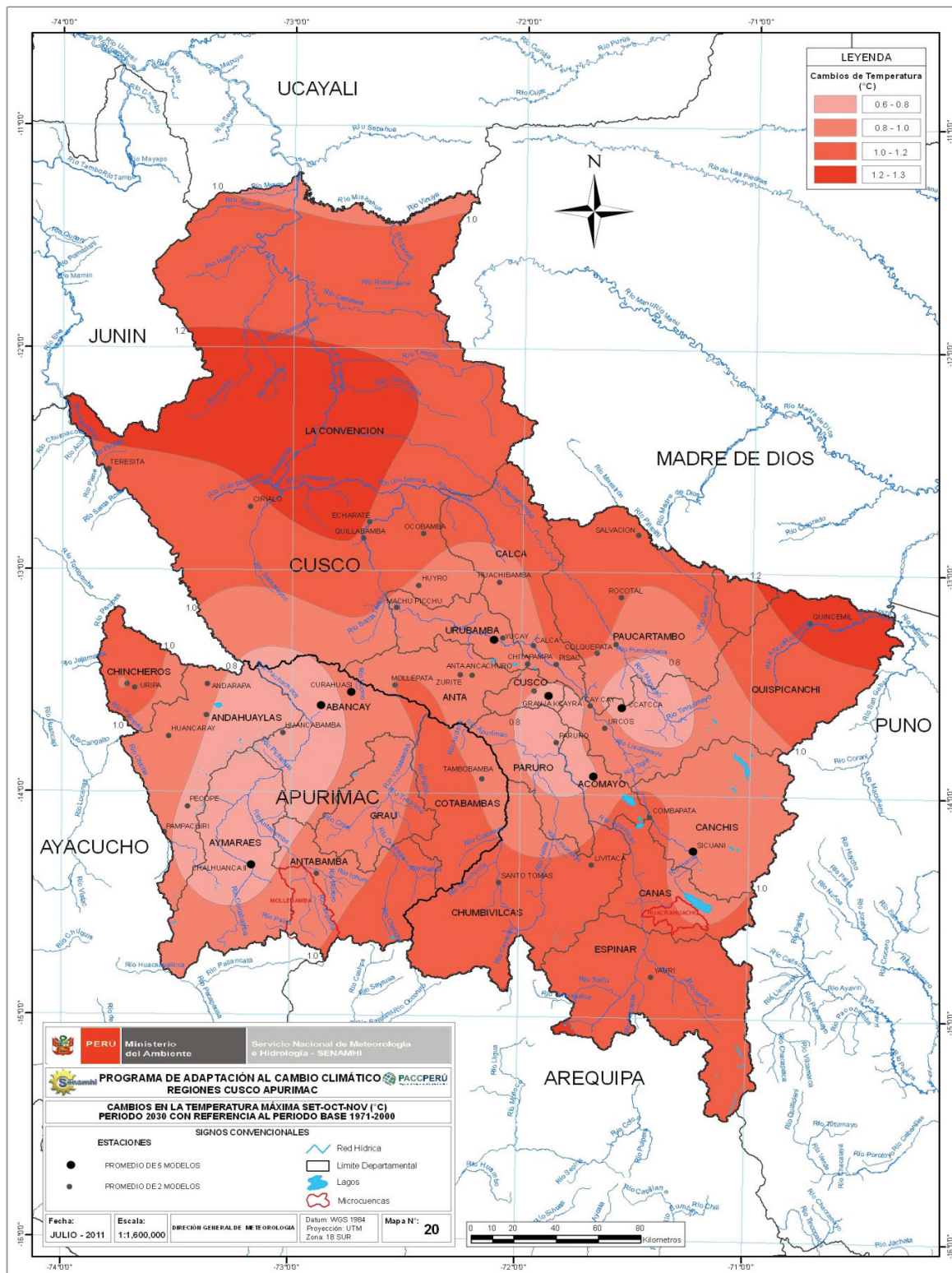
Mapa N° 17: Cambios en la temperatura máxima dic-ene-feb (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



Mapa N° 18: Cambios en la temperatura máxima mar-abr-may (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

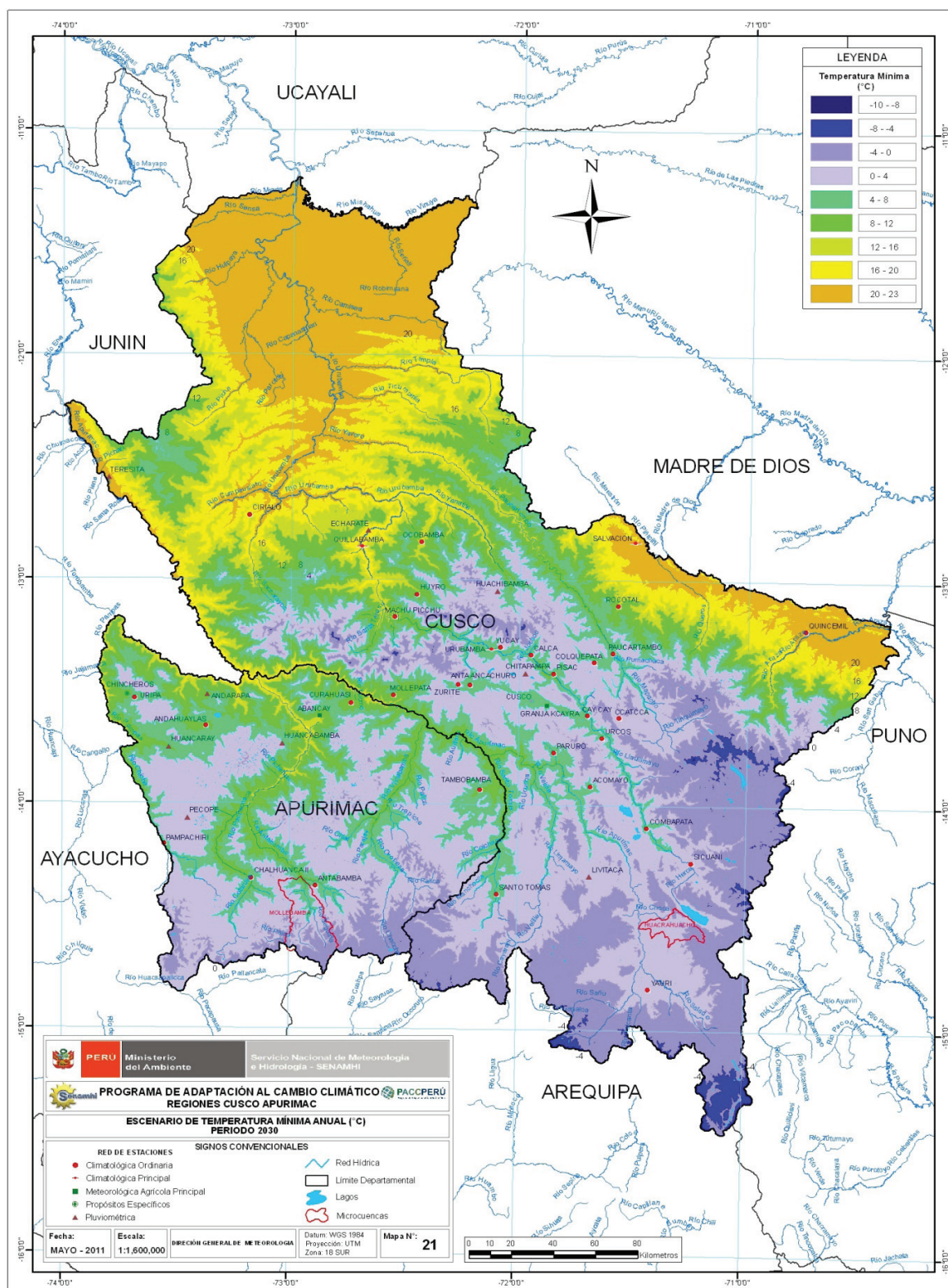


Mapa N° 19: Cambios en la temperatura máxima jun-jul-ago (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

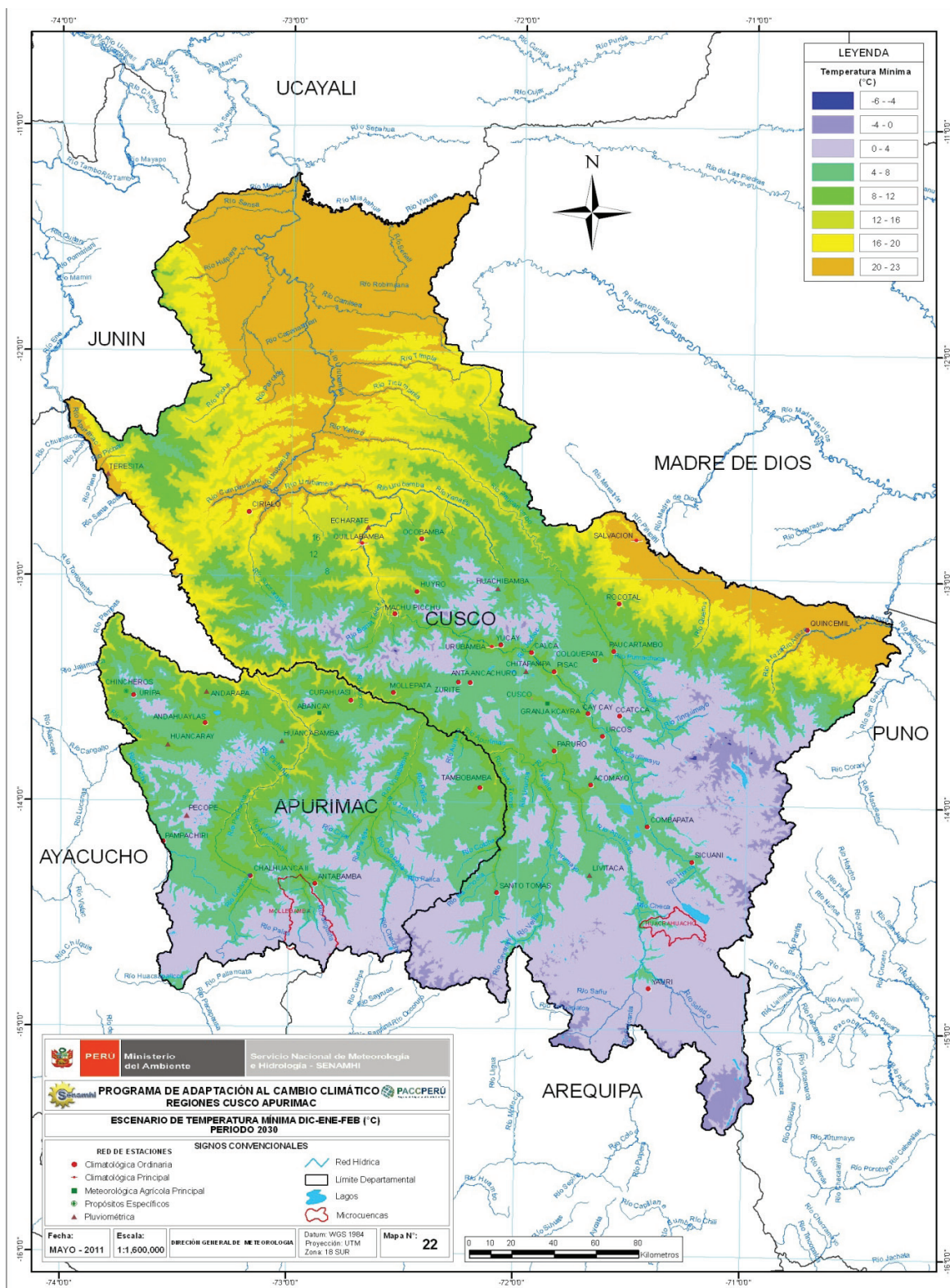


Mapa N° 20: Cambios en la temperatura máxima set-oct-nov (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

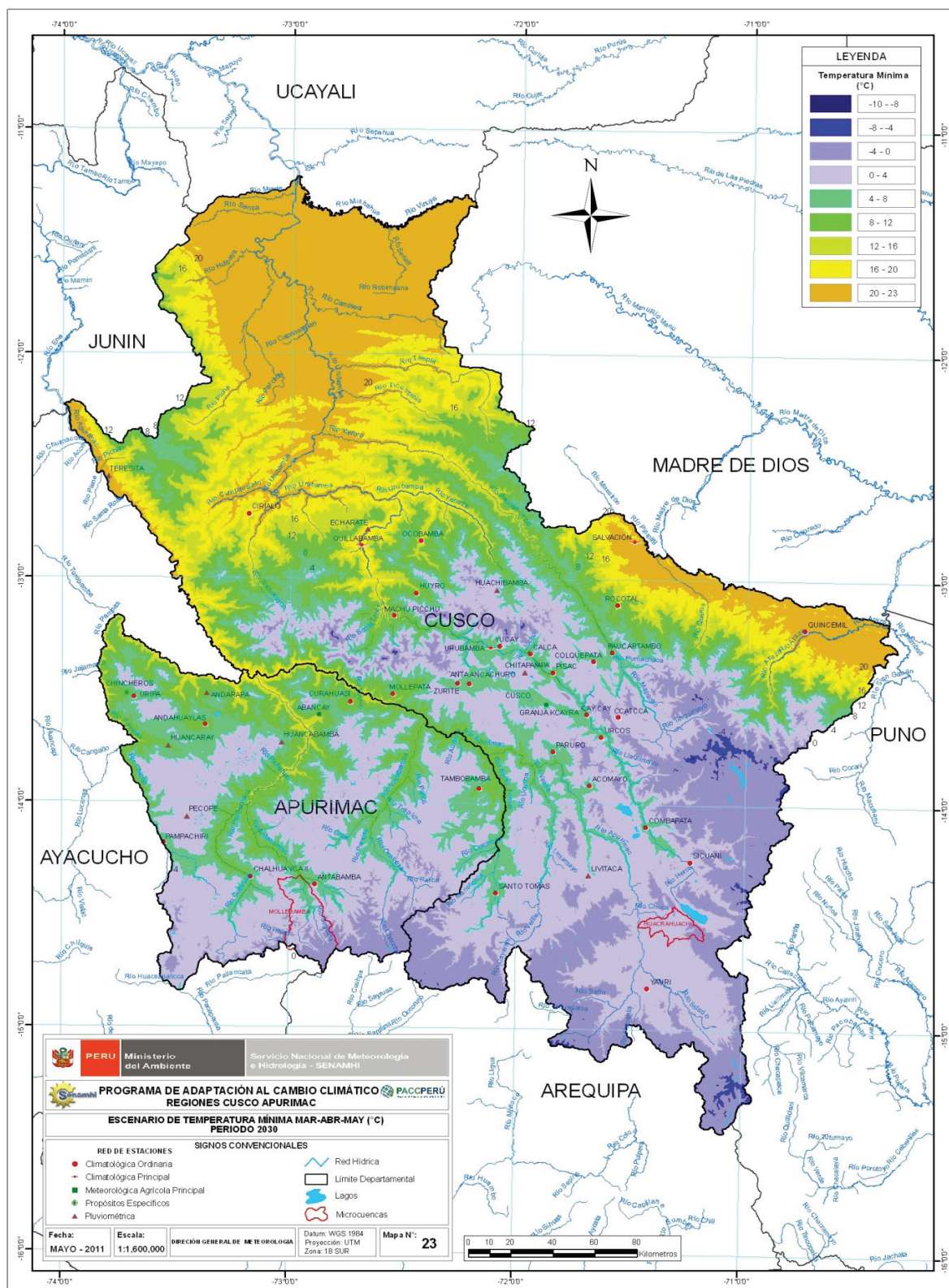
MAPAS DE ESCENARIOS DE TEMPERATURA MINIMA
PERIODO 2030
(2016-2044)



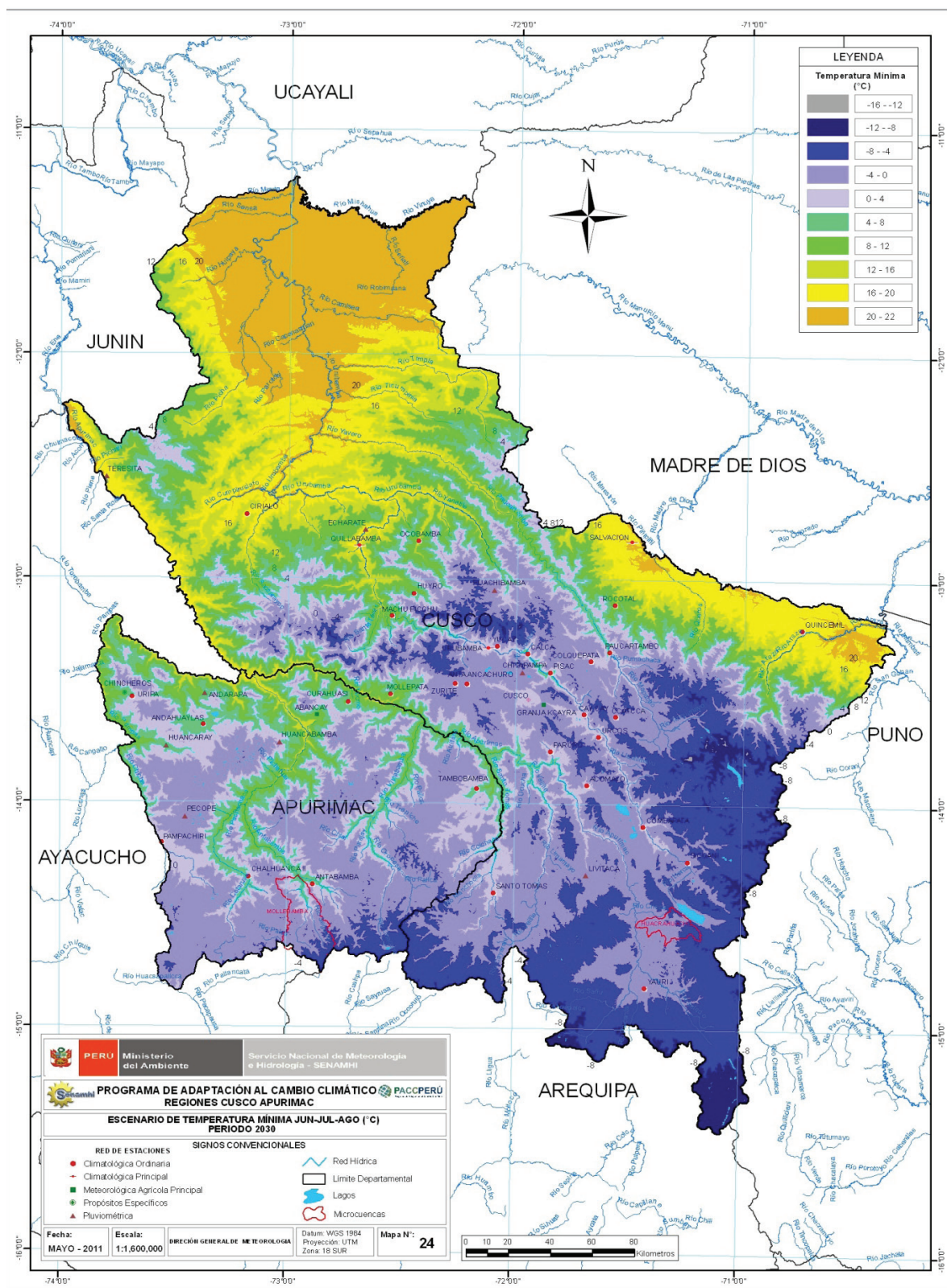
Mapa N° 21: Escenario de Temperatura mínima anual (°C) período 2030



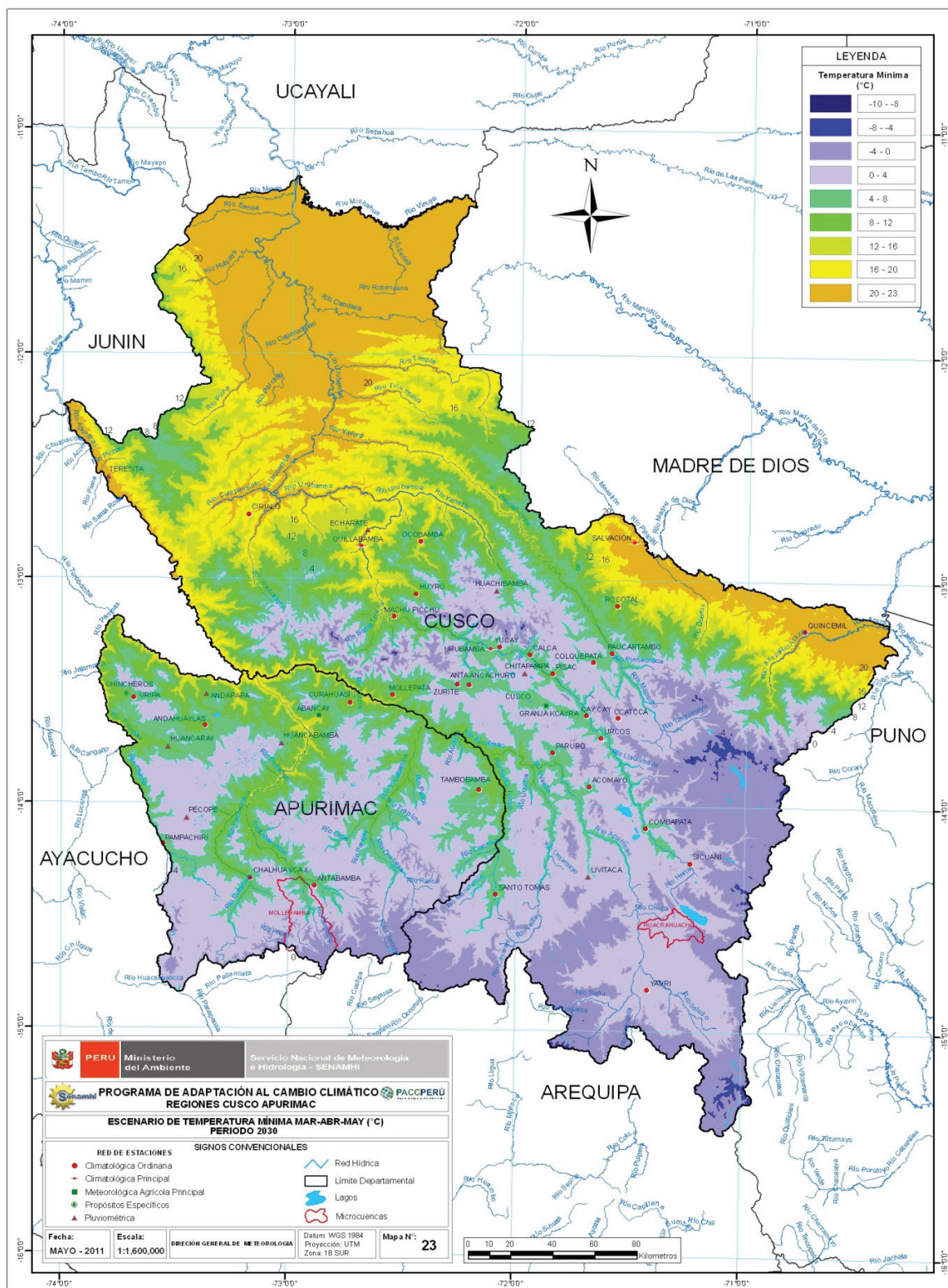
Mapa N° 22: Escenario de Temperatura mínima dic-ene-feb (°C) período 2030



Mapa N° 23: Escenario de Temperatura mínima mar-abr-may (°C) período 2030

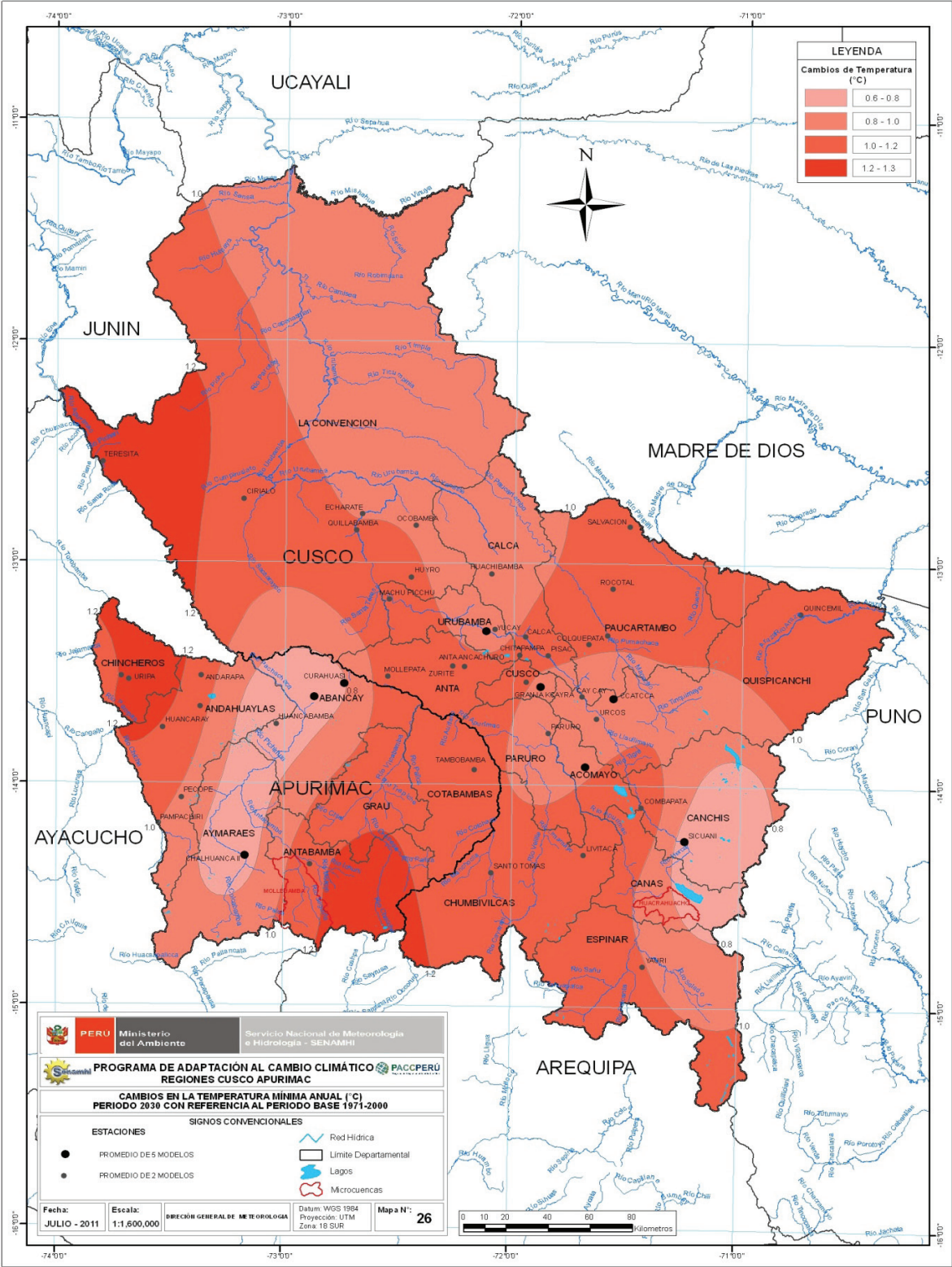


Mapa N° 24: Escenario de Temperatura mínima jun-jul-ago (°C) período 2030

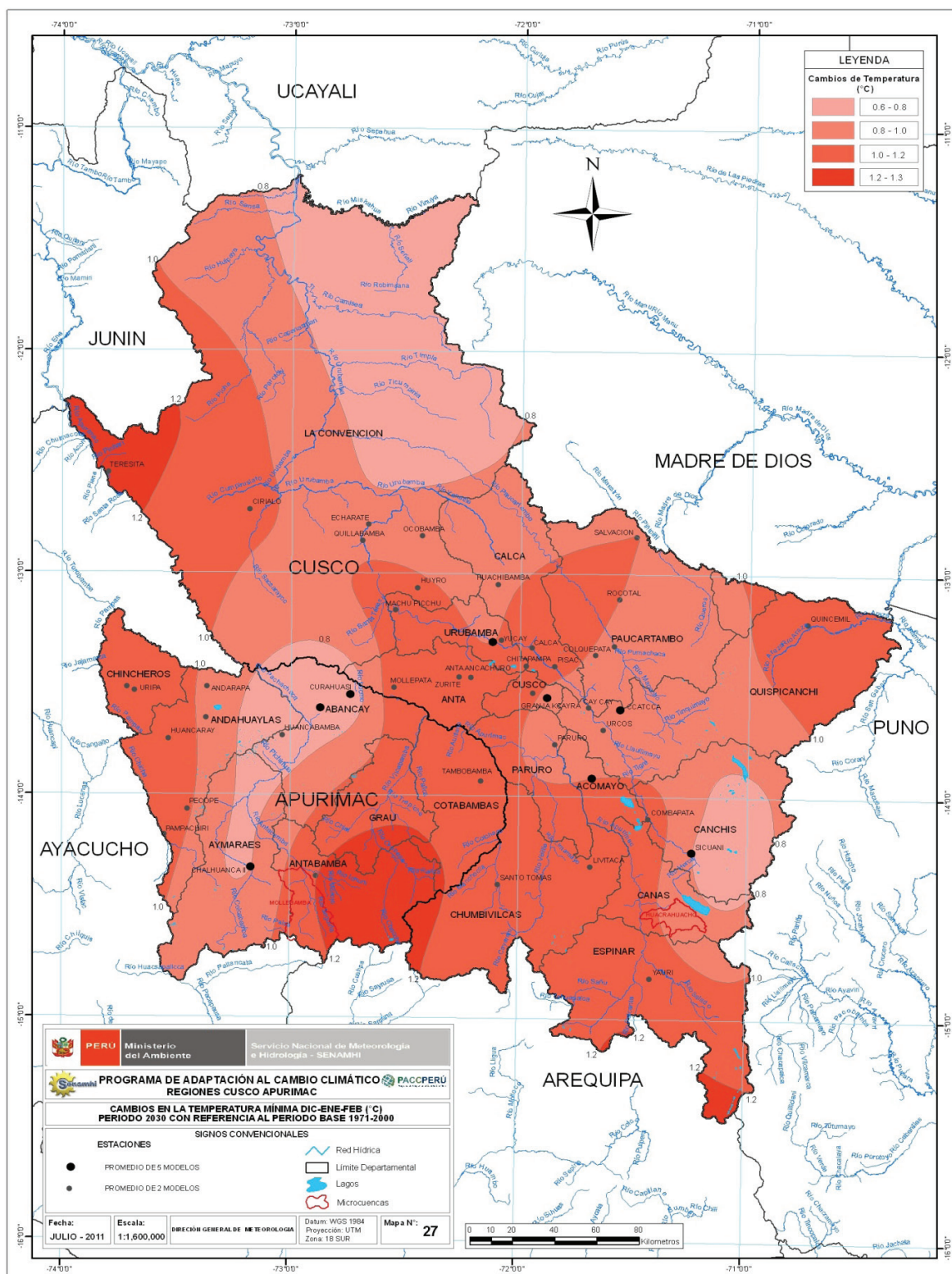


Mapa N° 25: Escenario de Temperatura mínima set-oct-nov (°C) período 2030

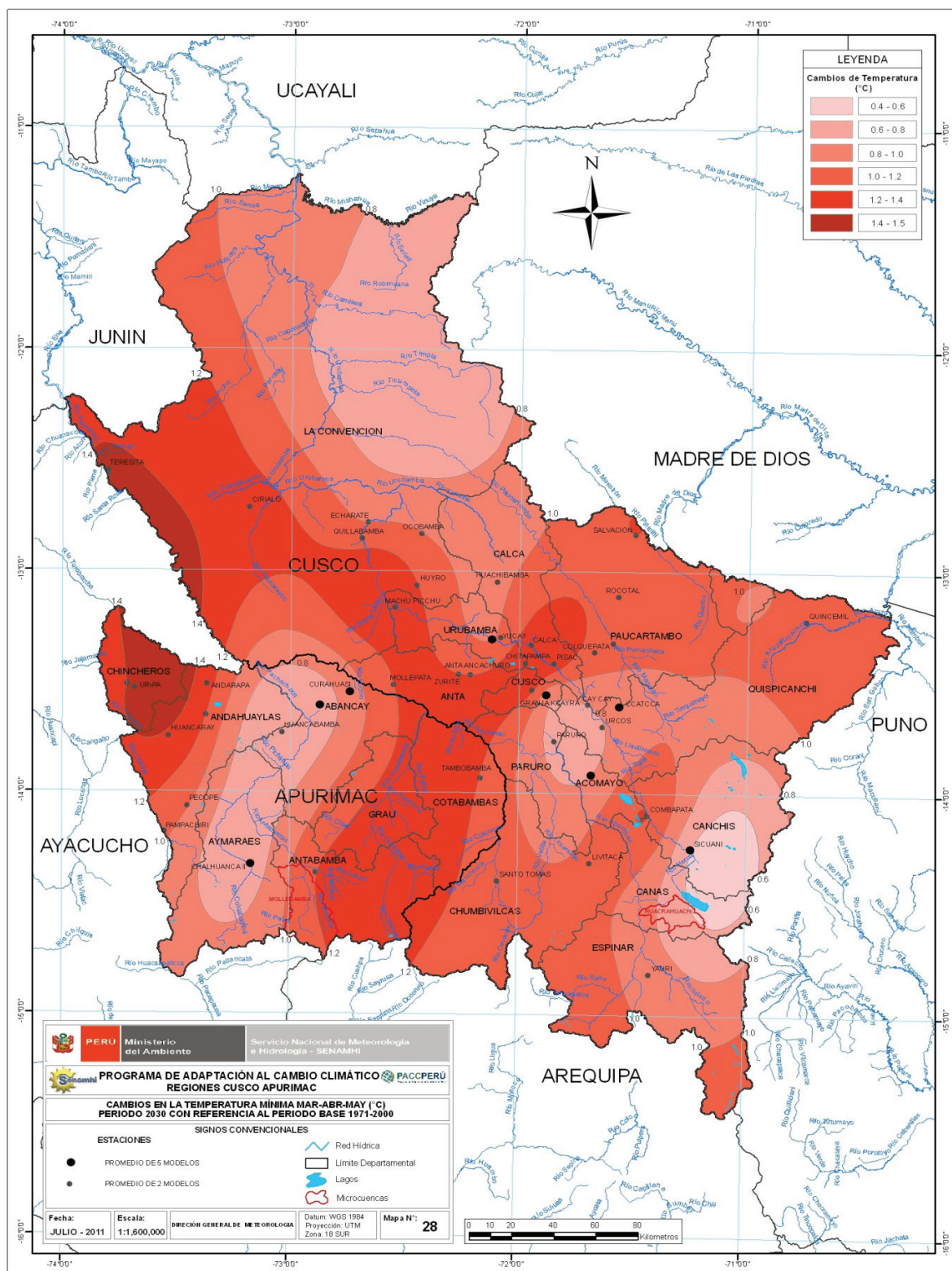
MAPAS DE CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MINIMA
PERIODO 2030
(2016-2044)



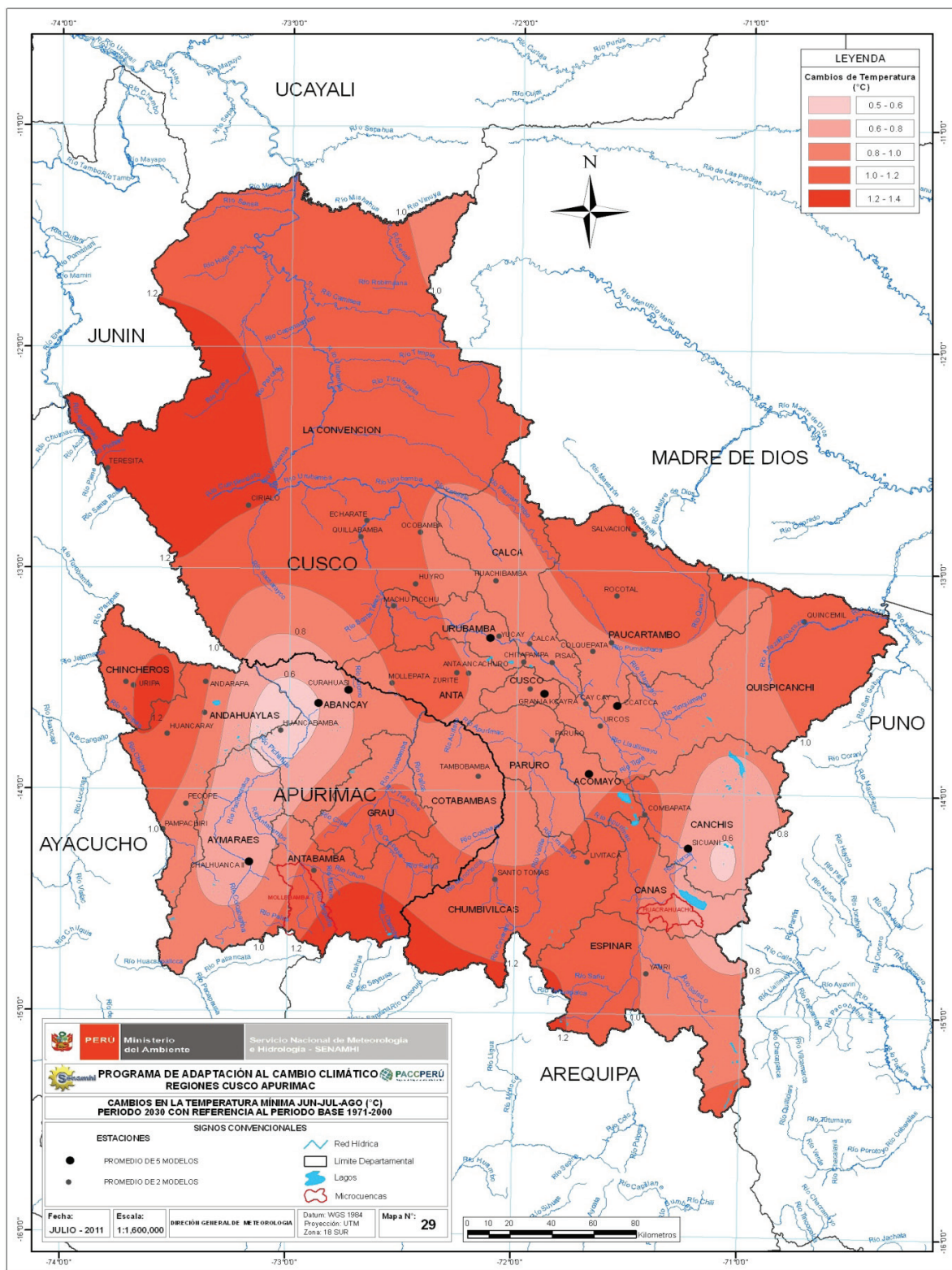
Mapa N° 26: Cambios en la temperatura mínima anual (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



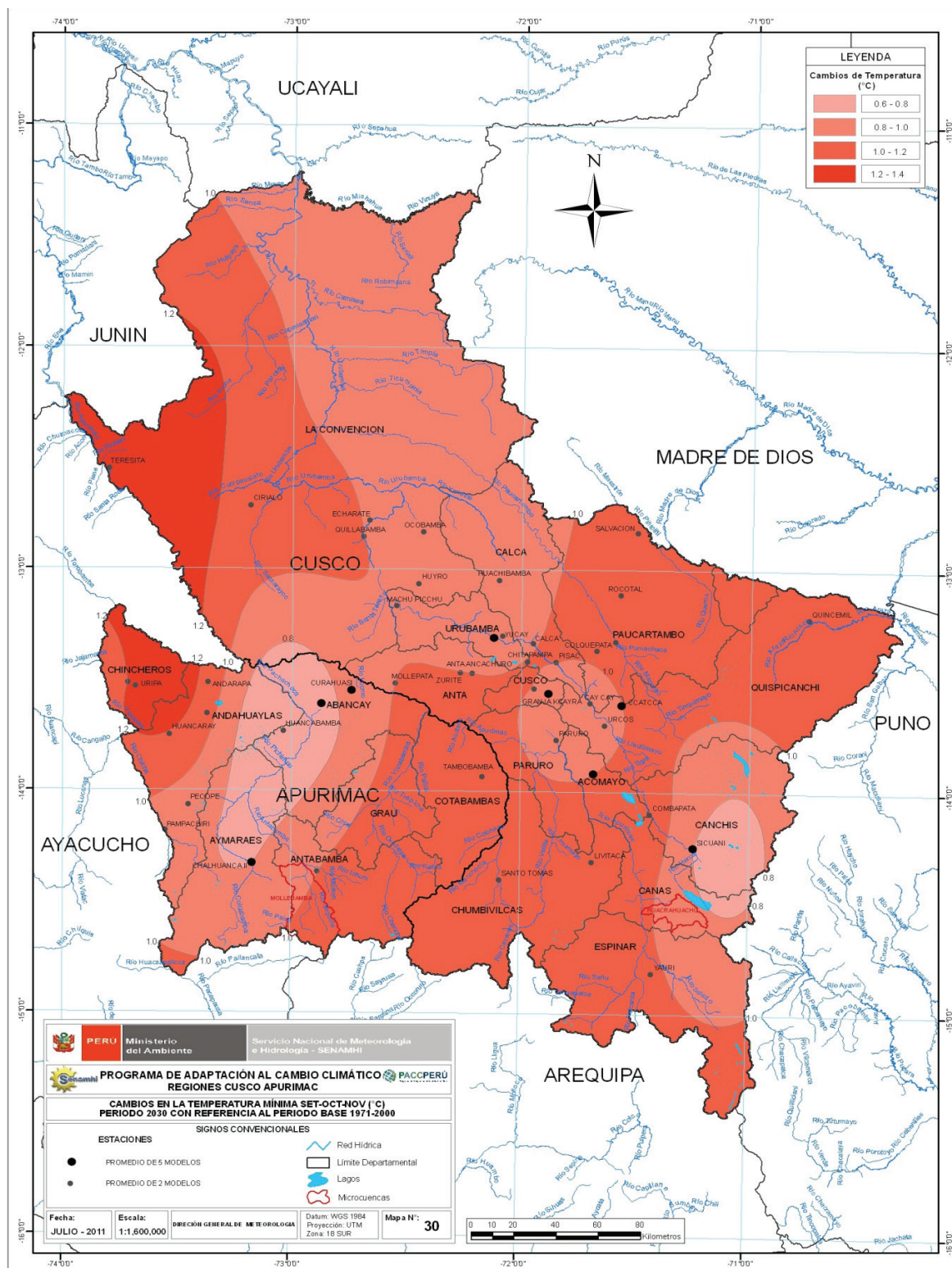
Mapa N° 27: Cambios en la temperatura mínima dic-ene-feb (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



Mapa N° 28: Cambios en la temperatura mínima mar-abr-may (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



Mapa N° 29: Cambios en la temperatura mínima jun-jul-ago (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000



Mapa N° 30: Cambios en la temperatura mínima set-oct-nov (°C) para el período 2030 con referencia al período base 1971-2000

8.2 Base matemática de las técnicas Aplicadas

8.2.1 Downscaling Dinámico

Las técnicas de regionalización dinámica reciben las proyecciones suministradas por los AOGCMs e introducen los detalles en las escalas no resueltas por ellos, es decir, permite aumentar la resolución de las proyecciones climáticas, incorporando relaciones entre variables a más resolución que la proporcionada por los AOGCMs, resolviendo procesos físicos en estas escalas más pequeñas asociados con información adicional de orografía, usos de suelo, etc. En consecuencia, las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos “padre” globales.

8.2.2 Downscaling y Funciones Empíricas Ortogonales

El downscaling o regionalización estadística está basado en la visión del clima regional es condicionado por dos factores: el estado del clima a gran escala y características fisiográficas locales (topografía, distribución mar-tierra y uso del suelo). Por lo que, desde esta perspectiva del clima regional se puede establecer un modelo estadístico, el cual relaciona variables a gran escala (predictores) con variables superficiales locales (predictandos); donde las salidas a gran escala de Modelos de Circulación Global (GCM, siglas en inglés) alimentan al modelo estadístico para estimar las correspondientes características climáticas locales o regionales (Wilby RL., et.al 2004). Todos los esquemas de regionalización estadística se basan en relaciones empíricas entre predictores y predictandos, estos métodos difieren principalmente en la forma de calcular la función de transferencia⁶ y en el proceso de ajuste estadístico. Dentro de los métodos estadísticos más usados están las técnicas de análisis multivariado, como: Análisis de Correlación Canónica, Descomposición de Valores Singulares y las Funciones Ortogonales Empíricas (EOFs).

El método de downscaling o regionalización estadística basado en la técnica lineal EOF también conocida como Análisis de Componentes Principales, es una herramienta útil para examinar tanto la variación temporal y espacial de los patrones climáticos, ya que distribuyen la variancia total de datos en un nuevo conjunto de patrones ortogonales compuestos por combinaciones de las variables originales (Eslinger, D. 1989). La ventaja de este método es que minimiza los errores asociados con la regionalización de escenarios climáticos futuros. Las series de tiempo para el análisis de los EOFs son usados tanto para la calibración de los modelos estadísticos, así como para la proyección de los escenarios futuros (Benestad, R. 2001).

El enfoque de esta técnica es ampliar los datos en términos de funciones del espacio óptimamente definidas, cada una de las cuales está asociada con una amplitud en función del tiempo.

Se considera M variables $p_m(t)$, que podrían representar la presión en M estaciones como funciones de tiempo. Estas son observadas en N tiempos, $t_1, t_2, t_3, \dots, T_N$. Ampliando $p_m(t_i)$ como sigue:

$$p_m(t_i) = \sum_{k=1}^M Y_{km} Q_k(t_i) \quad (1)$$

Aquí, Y_{km} son las funciones base de tiempo independiente desconocidas, que serán los EOFs y $Q_k(t_i)$ son los coeficientes o amplitudes de tiempo dependiente desconocidas. El número total de Y s es el mismo que el número total de estaciones, ya que la información espacial está contenida en los Y s. Si la sumatoria en (1) se

6

Función de transferencia es un modelo matemático que relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada.

toma sobretodos los Y 's, entonces se recobra el campo de entrada, sin pérdida de información.

Suponiendo, truncamiento de la serie:

$$p_m^K(t_p) = \sum_{k=1}^K Y_{km} Q_k(t_p) + r_m^K(t_p) \quad (2)$$

Donde, $K < M$, y $r_m^K(t_p)$ es el error asociado con el truncamiento. Nos gustaría elegir Y_{km} y $Q_k(t_p)$, de tal manera que:

$$R^K = \sum_{m=1}^M (r_m^K)^2 \quad (3)$$

Es minimizado para un K dado. Lorentz, muestra que R^K es minimizado si se elige Y_{km} y $Q_k(t_p)$, de modo que:

$$1 \text{ si } k = j$$

$$\sum_{m=1}^M Y_{km} Y_{jm} = \delta_{kj} \equiv \begin{cases} 1 & \text{si } k = j \\ 0 & \text{si } k \neq j \end{cases} \quad (4)$$

y

$$NQ_k^* Q_j^* = a_k \delta_{kj} \quad (5)$$

donde $a_k \geq a_{k+1} \geq 0$. En (5), (\cdot) denota un tiempo promedio, y $(\cdot)^*$ denota una desviación del tiempo medio. El significado de (4) es que los EOFs son ortogonales en el espacio. El significado de (5) es que la amplitud de los EOFs son ortogonales en el tiempo.

Esta ortogonalidad tanto en el espacio como en el tiempo es que hace que los EOFs sean una representación "óptima" de los datos.

8.2.3 Base matemática de la interpolación para regrillado de la información de los AOGCMs.

La interpolación grillada se construye sobre una grilla de latitudes y longitudes, de la forma siguiente: dado dos longitudes y dos latitudes vecinas (x_1, x_2, y_1, y_2) de la grilla de entrada, los nuevos valores de X e Y ubicados en $x_1 \leq x \leq x_2$ y $y_1 \leq y \leq y_2$ es asignado de la forma:

$$a = a_{11} + (a_{21} - a_{11}) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + (a_{12} - a_{11}) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} + (a_{22} - a_{21} - a_{12} + a_{11}) \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

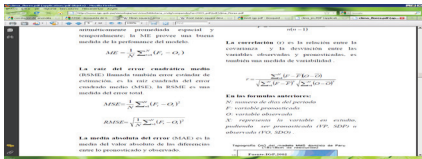
Donde:

a_{ij} es el valor en longitud x_i y latitud y_j .

Si uno de los 4 valores $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ es nulo, el valor de la variable también será nulo.

$$a_{11}(X_1, Y_1) \quad a_{12}(X_2, Y_1)$$

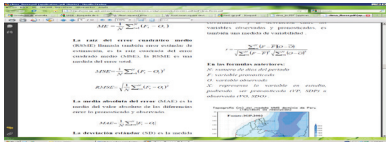
CORRELACIÓN DE ANOMALÍAS: El llamado coeficiente de correlación Pearson, es un índice que mide el grado de relación lineal entre dos variables (F,O) cuantitativas, en este caso, las variables son anomalías.



F: datos de modelo

O: datos observados

RMSE: Medida de las diferencias entre dos variables cuantitativas, un modelo o estimador (F) y los valores observados (O), para un N numero de datos.



REOLOGIA: Estudio de los fluidos considerando efectos como la viscosidad, deformación y regulación de su movimiento.